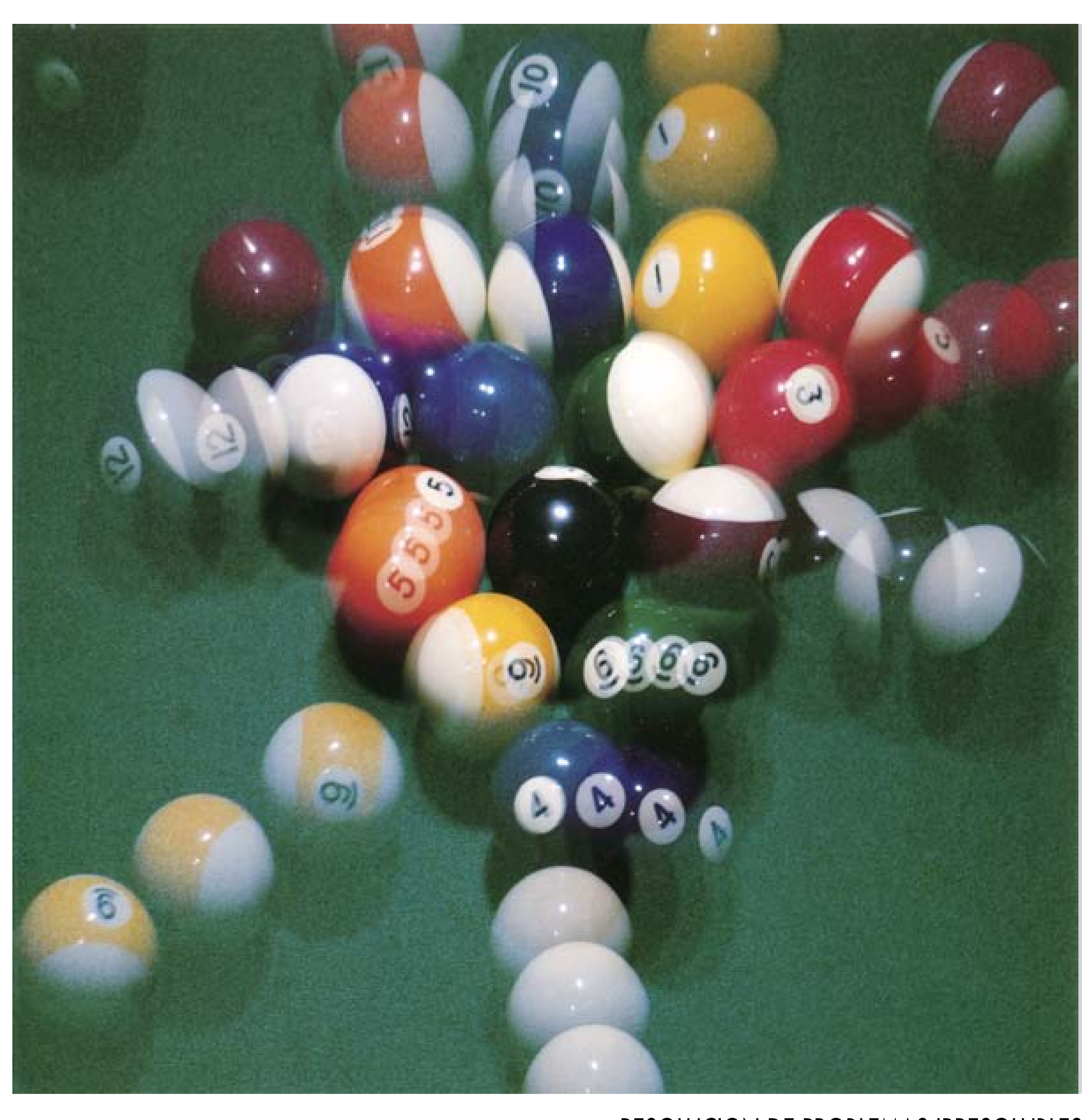
INVESTIGACION y CIENCIA

EN BUSCA DE LA MATERIA EXTRAÑA

SEXUALIDAD ANIMAL

ACTIVACION DE PRECURSORES DE PROTEINAS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



RESOLUCION DE PROBLEMAS IRRESOLUBLES

MARZO 1994
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa




Marzo de 1994 Número 210

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

A. Comín Sebastián: *Humedales*; F. A. Marcos Marín: *Diversidad lingüística del mundo*; E. Santiago: *Toxinas de cianobacterias*; Luis Bou: *Resolución de problemas irresolubles* y *Juegos matemáticos*; Joandomènec Ros: *Sexualidad animal*; Ramón Pascual: *En busca de la materia extraña*; J. Vilardell: *Hace...*; Shigeko Suzuki: *De cerca*.

Ciencia y sociedad:

Alina Quevedo, Ana M.ª Rubio y Juan Pedro Adrados

Ciencia y empresa:

J. M.ª Terricabras y M. Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Richard Megna, Fundamental Photographs

Página	Fuente
6-7	Stephen Ferry/Matrix
8-11	Roberto Osti
12	Cindy Pelescak/South Florida Water Management Distric
13	Francisco A. Comín
15	Patricia J. Wynne
16-17	Dimitry Schidlovsky
18-19	Johnny Johnson
20	Réunion des Musées Nationaux, París
23-24	Wayne W. Carmichael
25	A. S. Dabholkar, Universidad Estatal Wright (*izquierda*), Jared Schneidman/JSD (*derecha*)
26	Jared Schneidman/JSD
28	A. S. Dabholkar (*arriba*), Jared Schneidman/JSD (*abajo*)
29	Sushmita Ghosh, Universidad de Illinois (*arriba*), Guilbert Gates/JSD (*abajo*)
30	Mafo Plata
36-37	Manuel Crespo
42-43	Michael Crawford
45	UPI/Bettmann
46	Spassimir H. Paskov, Universidad de Columbia (*arriba*)
47	Michael Crawford
48	NASA
50-51	Patricia J. Wynne
52	Patricia J. Wynne (*arriba*), Lisa Burnett (*arriba*)
53	Gordon Akwera/JSD
54	David Crews
55	Lisa Burnett (*arriba*), Pauline I. Yahr (*abajo*)
56	M. L. East y H. Hofer (*izquierda*), S. G. Hoffman (*derecha*)
58-59	Cristopher Burke; Quesada/Burke Photography (*arriba*), Michael Goodman (*abajo*)
60-61	Michael Goodman
62	Edward Bell
64	Michael Goodman
66	Cortesía de Gerard J. Holzmann
67	Steven Murez/Black Star
68	Guilbert Gates/JSD
69	Gabor Kiss
72	Cortesía de Gerard J. Holzmann
73	Televerket Tryck & Bild
74-81	Francesc X. Avilés, Alicia Guasch y Josep Vendrell
86	Andrew Christie
87	Michael Goodman
88	Centro de Geometría de la Universidad de Minnesota



LA PORTADA es una metáfora: complejidad en grado sumo, a causa de un gran número de variables. Las 16 bolas de billar, con sus efectos y carambolas, hacen casi imposible calcular la dinámica de la tacada. La resolución de problemas multivariantes exigiría millones de años de cómputo. Pero según teoremas recientes, ciertos problemas intratables pueden ser resueltos si nos conformamos con lo que ocurre casi siempre, aunque no siempre. (*véase* "Resolución de problemas irresolubles," por J. F. Traub y H. Woźniakowski, en este mismo número.)

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Según Ralph R. Seal, director de investigación de los laboratorios RCA, un tipo radicalmente distinto de radioestación repetidora 'baliza' hará que, tras la guerra, la retransmisión de programas de televisión sea una cuestión relativamente sencilla. Se prevé que esas estaciones, que funcionarán sin atención humana, estarán repartidas, a intervalos entre 30 y 80 kilómetros, no sólo formando una red nacional de enlace entre las emisoras de televisión sino que además inaugurarán una nueva era en las comunicaciones internacionales. Esos repetidores trabajarán con microondas con la energía concentrada casi en una línea recta.»

«En el futuro próximo habrá que ver en el gas natural una fuente de materia prima de la industria química. En la actualidad, el noventa y cinco por ciento de la producción se destina a combustible industrial o doméstico. Pero es completamente probable que vayan a parar a otros usos cantidades cada vez mayores de este gas. Entre otros productos obtenibles, directa o indirectamente, del gas natural se cuentan el butadieno, la glicerina, el tetracloruro de carbono, la gasolina, fármacos de sulfamidas y fertilizantes.»

«El recién terminado ferrocarril metropolitano de State Street en Chicago está probando su valía dentro de la extensa red de transportes de la ciudad. Aunque ideado para aliviar el tremendamente congestionado tráfico en las líneas del elevado de la famosa zona céntrica del 'Loop', esta moderna instalación de transporte incluye numerosas comodidades para sus usuarios. Por ejemplo: hay escaleras mecánicas que facilitan el acceso a los andenes y ventiladores automáticos que alimentan de aire fresco al interior. Este tramo, de algo menos de seis kilómetros, es el primero de un conjunto de cuatro que se proyecta terminar.»

...cien años

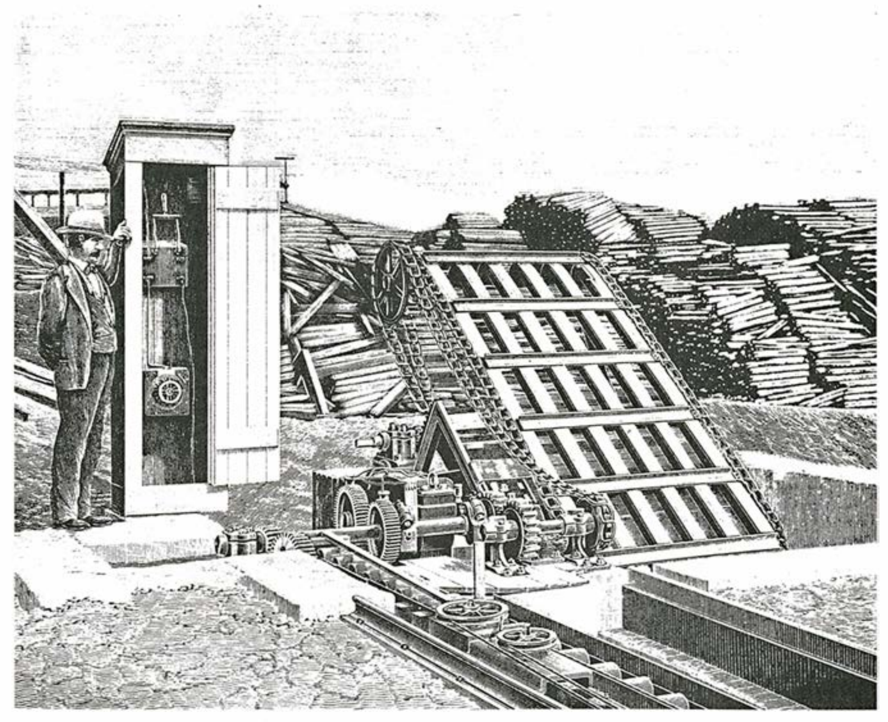
SCIENTIFIC AMERICAN: «Escribe Mr. F. Corkell a *Mining and Scientific Press*: En la noche del uno de febrero hizo su aparición un brillante meteoro en Candelaria (Nevada). De repente, durante unos cuatro segundos, causó una tremenda iluminación, de un azul eléctrico cegador, como si se hubieran encendido un gran número de arcos eléctricos. Al cabo de treinta segundos tuvo lugar un terrible estallido, que sacudió las colinas y cuyo eco repitieron las rocosas cavernas. Luego se oyó un fragor sibilante, como el de una enorme masa de hierro al rojo que se enfriara en agua. Este duró como unos quince segundos.»

«Paul Bert ha descubierto experimentalmente que el oxígeno, un gas vital donde los haya, constituye un fortísimo veneno para las plantas y los animales, para las células y para todo el organismo; y, si en el aire se presenta en determinadas proporciones, se convierte de inmediato en un instrumento mortal. Es éste uno de los descubrimientos modernos más curiosos. Sin oxígeno, no hay vida; con demasiado oxígeno, tampoco.—*Opinión Pública, de Revue de Deux Mondes*.»

«Este invierno, una tarde, pese a estar caminando a paso vivo me notaba desagradablemente frío; tenía las orejas tan frías que a cada momento necesitaba aplicarles mis manos enguantadas. Comencé entonces a inspirar con fuerza y profundamente, reteniendo el aire lo más posible antes de expulsarlo. Tras algunas inhalaciones, la superficie de mi cuerpo se puso más cálida. Luego el efecto lo noté en las orejas. Al cabo del tiempo que tardé en recorrer tres manzanas, las manos y los pies participaron del calor general y me sentí tan confortable como si hubiera pasado ese tiempo junto a una estufa incandescente.—*E. B. Sangree, médico, American Therapist*.»

«Los camellos que hoy día crecen en estado salvaje en Arizona son los descendientes de un pequeño rebaño originalmente importado a Virginia City (Nevada) para emplearlos en el transporte de sal por el desierto. Al final fueron enviados a Arizona para transportar mineral. Pero allí se les debilitaban las patas y fueron abandonados a su suerte.—*San Francisco Chronicle*.»

«Nuestra ilustración muestra una instalación eléctrica empleada en la planta de Joliet de la Illinois Steel Company para cargar lingotes de acero en bateas de ferrocarril con un mínimo de intervención humana. Los lingotes son transferidos desde el parque a una línea de rodillos, parte de la cual se ve a la izquierda de la ilustración, y así viajan hasta chocar con una placa deflectora, que los conduce a la banda transportadora inclinada que claramente se ve en la figura. La banda eleva primero los lingotes y después los deja caer sobre un vagón que se encuentra en una vía de ferrocarril excavada en el otro lado.»



Manipulación de lingotes de acero con energía eléctrica

Humedales

Estos refugios de biodiversidad corren peligro de desaparecer. Sus características son muy fluctuantes. Comprenderlas puede llevar a tener más exito en los esfuerzos conservacionistas

Jon A. Kusler, William J. Mitsch y Joseph S. Larson

Las zonas húmedas pueden aparecer muy secas, muy inundadas o en cualquier situación intermedia; por esta característica propia son muy proteiformes. Esos cambios constantes hacen de los humedales unos ecosistemas ecológicamente muy ricos, cuya diversidad rivaliza con la de las selvas tropicales. Son, estos sistemas acuáticos, decisivos para que se cumpla el ciclo vital de plantas y animales, algunos de ellos en peligro de extinción. Constituyen el hábitat, y proporcionan lugares de puesta, para una extraordinaria variedad de criaturas; también anidan en ellos aves migratorias. Algunos humedales tienen incluso una función global. En particular, las turberas del norte de Canada, Alaska y Eurasia contribuyen a moderar los cambios climáticos actuando como sumideros de dióxido de carbono, el gas principal del efecto invernadero.

Los humedales tienen valores comerciales y cumplen funciones muy útiles. Son fuente de cultivos lucrativos de arroz silvestre, de animales de los cuales se aprovechan sus pieles, de peces y marisco. Las zonas húmedas atemperan los efectos perjudiciales de las olas, amortiguan y almacenan las aguas de inundación, retienen el sedimento y reducen la contaminación; en virtud de este último atributo se merecen el sobrenombre de "riñones de la naturaleza".

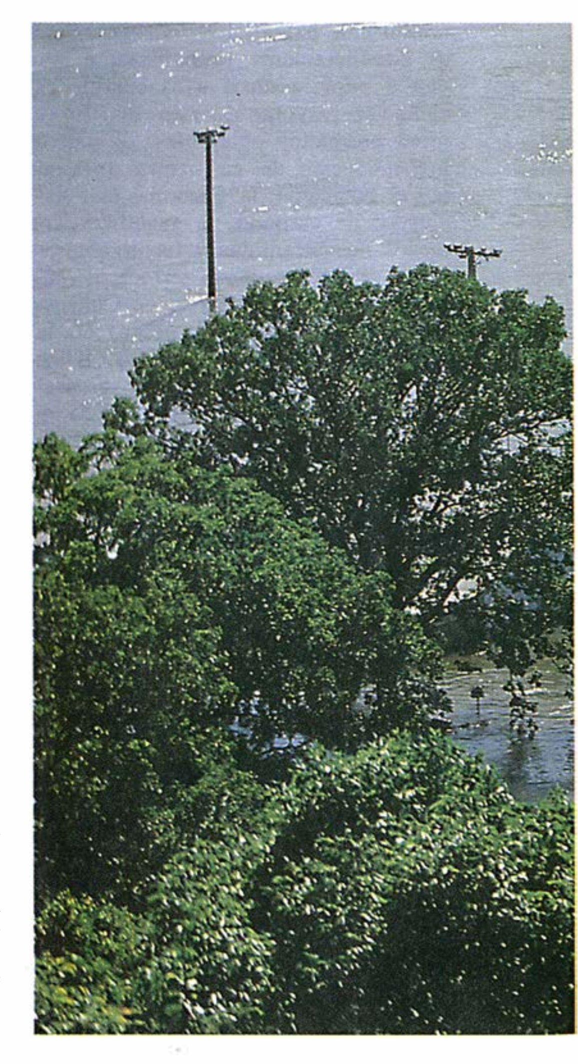
Pese a su inmenso valor, los humedales están desapareciendo rápidamente. Se ha destruido más de la mitad de las zonas húmedas de los Estados Unidos, excepto en Alaska y Hawai. Entre los años cincuenta y setenta se desecaron más de 36.000 km^2 de zonas húmedas. No se dispone de datos precisos a una escala internacional, pero se estima que las zonas húmedas constituyen hoy en día el 6 % de la superficie de la Tierra.

Las pérdidas se pueden atribuir, por lo común, al mismo carácter que los hace tan valiosos: su naturaleza siempre cambiante. La compleja dinámica de los humedales complica los esfuerzos para crear políticas para su conservación. Su gestión y protección deben incorporar una definición realista, que abarque todos estos intrincados ecosistemas —desde marismas, ciénagas y pantanos hasta estanques temporales, lagos playa y lagunas de pradera. Si los ecólogos pudieran aclarar y comunicar al público y a los gestores políticos las especiales características de los humedales, así como su importancia económica y biológica, quizá no llegarían a desaparecer las zonas húmedas que todavía se conserven.

A lo largo de los años, investigadores y organismos gubernamentales han propuesto muchas definiciones de humedal. Todas tienen en común el reconocer que se trata de sistemas acuáticos someros, o áreas en las que el agua subterránea está cercana a la superficie terrestre durante algún tiempo. La mayoría de las descripciones también incluyen la presencia de plantas acuáticas, y de suelos hídricos, los cuales, cuando están inundados, desarrollan colores y olores que los distingue de los suelos de tierras altas, no inundables.

Los humedales se encuentran en situaciones topográficas muy diversas. Algunos se desarrollan, por inundación mareal, en zonas resguardadas de las planicies costeras, como las marismas y manglares. Otros existen en las márgenes de ríos, arroyos y lagos y en sus llanuras de inundación. Se pueden, asimismo, formar sobre cualquier tipo de sustrato, en

JON A. KUSLER, WILLIAM J. MITSCH y JOSEPH S. LARSON trabajan sobre diferentes aspectos de la gestión y ecología de humedales. Kusler dirige la Asociación de Gestores de Humedales. Mitsch es profesor de recursos naturales y ciencias ambientales en la Universidad de Ohio, y Larson está al frente del Instituto Ambiental de la Universidad de Massachusetts en Amherst.



1. DESBORDAMIENTO del río Missouri. No sólo dejó casas sumergidas, sino que también demostró de forma rotunda los peligros derivados de la destrucción de humedales. Si no se alteran, estas zonas húmedas absorben gran parte de la onda de inundación. La urbanización de las planicies aluviales puede reducir o eliminar esta capacidad.

depresiones del relieve superficial. Entre estos humedales se encuentran las marismas de agua dulce, lagunas de pradera, prados húmedos, lagunas tipo playa y charcas de lluvia en las que la vegetación no es arbustiva, así como los pantanos cenagosos, en los que la vegetación sí es arbustiva. Pueden encontrarse también humedales en laderas y en la base de laderas, alimentados por manantiales, y como turberas altas ("bogs") y turberas bajas ("fens"), que reciben agua de precipitación y agua subterránea, respectivamente. Y hallamos, por fin, humedales en zonas con climas fríos donde los hielos permanentes ("permafrost") y las bajas tasas de evaporación contribuyen a retener agua en el suelo.

Aunque los tipos de humedales y sus localizaciones varían muchísimo, todos presentan, como rasgo central, las fluctuaciones del nivel del agua. El agua sube o baja de acuerdo con las mareas, la precipitación o la escorrentía; por supuesto, la acción del hombre y de otros animales también influye en los niveles del agua. La extensión de la fluctuación suele diferir bastante de un lugar a otro. En las marismas del noreste de los Estados Unidos y del este de Canadá las mareas diarias pueden ocasionar cambios del nivel del agua de tres metros. En otras regiones experimenta cambios aún mayores; así, durante la estación de las lluvias, el nivel del agua puede subir 7,5 metros en el río Amazonas e invadir las zonas húmedas próximas. En las lagunas de las praderas del medio oeste norteamericano, el aporte de agua subterránea o el deshielo pueden hacer variar los niveles del agua hasta 1,25 m en varios años.

A pesar de que los niveles del agua fluctúen drásticamente, estos ecosistemas pueden ajustarse a los cambios, de modo que sufren poco daño permanente por esta causa. La verdad es que la existencia de algunos humedales guarda relación con los efectos devastadores de huracanes, inundaciones y sequías. La mayoría de las zonas húmedas en las márgenes de los ríos y en las zonas costeras, así como las formadas en depresiones del terreno, son duraderas debido a eventos que la gente considera económicamente devastadores. Los fuegos violentos queman el exceso de materia orgánica depositada en el sotobosque y reciclan nutrientes. Los huracanes y las inundaciones de alta velocidad de desarrollo arrastran sedimentos y materia orgánica, extrayéndolos de las zonas húmedas y creando otras nuevas en las proximidades de las primeras. Las sequías destruyen temporalmente la vegetación hidrofítica y permiten la oxigenación y la compactación de los suelos orgánicos.

Este carácter anómalo de los humedales —el modo en que una destrucción a corto plazo asegura una ganancia a largo plazo— no suele entenderlo el público. Recuérdese el huracán *Andrew* y su impacto en los Everglades de Florida. Aunque el daño fue grave, el ecosistema y otros como él han sobrevivido a miles de estos cataclismos. Algunos han sugerido que los árboles en las ciénagas costeras de manglar alcanzan la madurez a una edad de alrededor de 30 años, intervalo que coincide casi perfectamente con la frecuencia de los huracanes en los trópicos.



Por no entenderlo bien, se ha optado a veces por estabilizar el nivel del agua en las zonas húmedas. La grave inundación ocurrida el verano pasado a lo largo del Mississippi, del Missouri y otros ríos debióse a que muchas zonas húmedas de las márgenes de esos cursos habían sido alteradas para la construcción de viviendas. Y dejaron de servir para absorber las aguas de inundación.

Los niveles de muchas masas de agua suben y bajan. Los lagos y arroyos están ocupados por plantas y animales que están adaptados a un ambiente con agua permanente —no soportan los períodos de sequía, aunque sean cortos. Por contra, en un humedal se encuentran ambientes acuáticos someros y suelos saturados de agua que les confieren algunas características de medio terrestre y otras de medio acuático. Debido a que el nivel de agua sube y baja

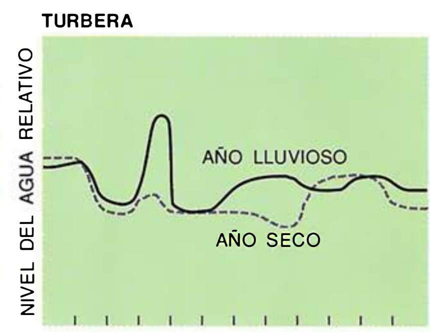
Fluctuaciones del nivel del agua en los humedales

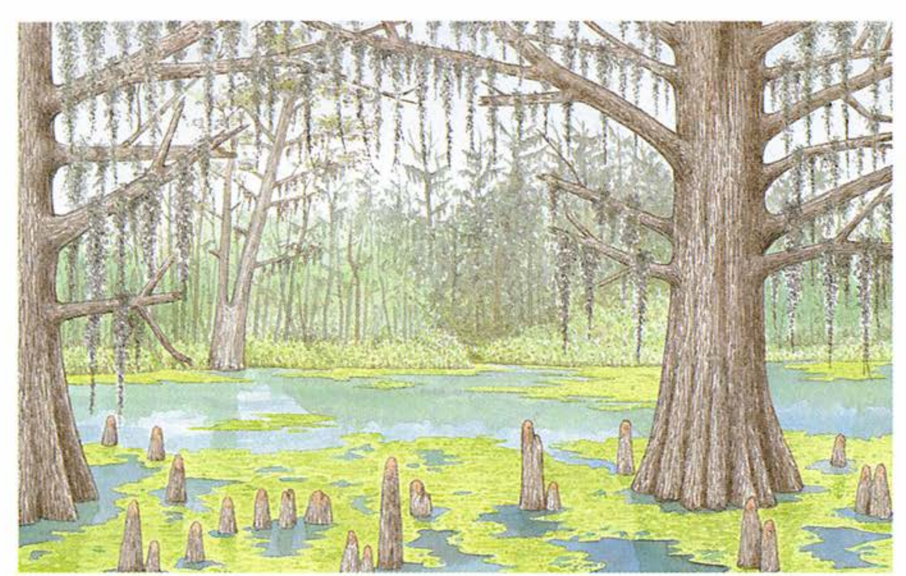
Los humedales suelen diferir en su morfología y en las especies que albergan, como divergen también en el rango de saturación de agua que experimentan en el curso de un año o de una estación climatológica. La variedad topográfica de las zonas húmedas y la complejidad de su hidrología han dificultado su conservación.

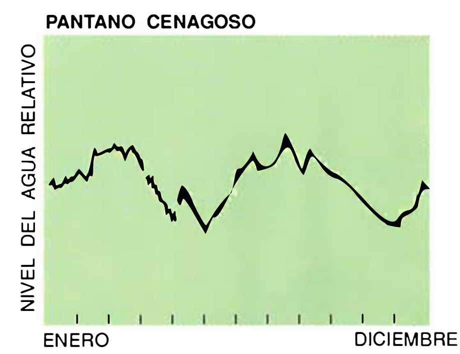






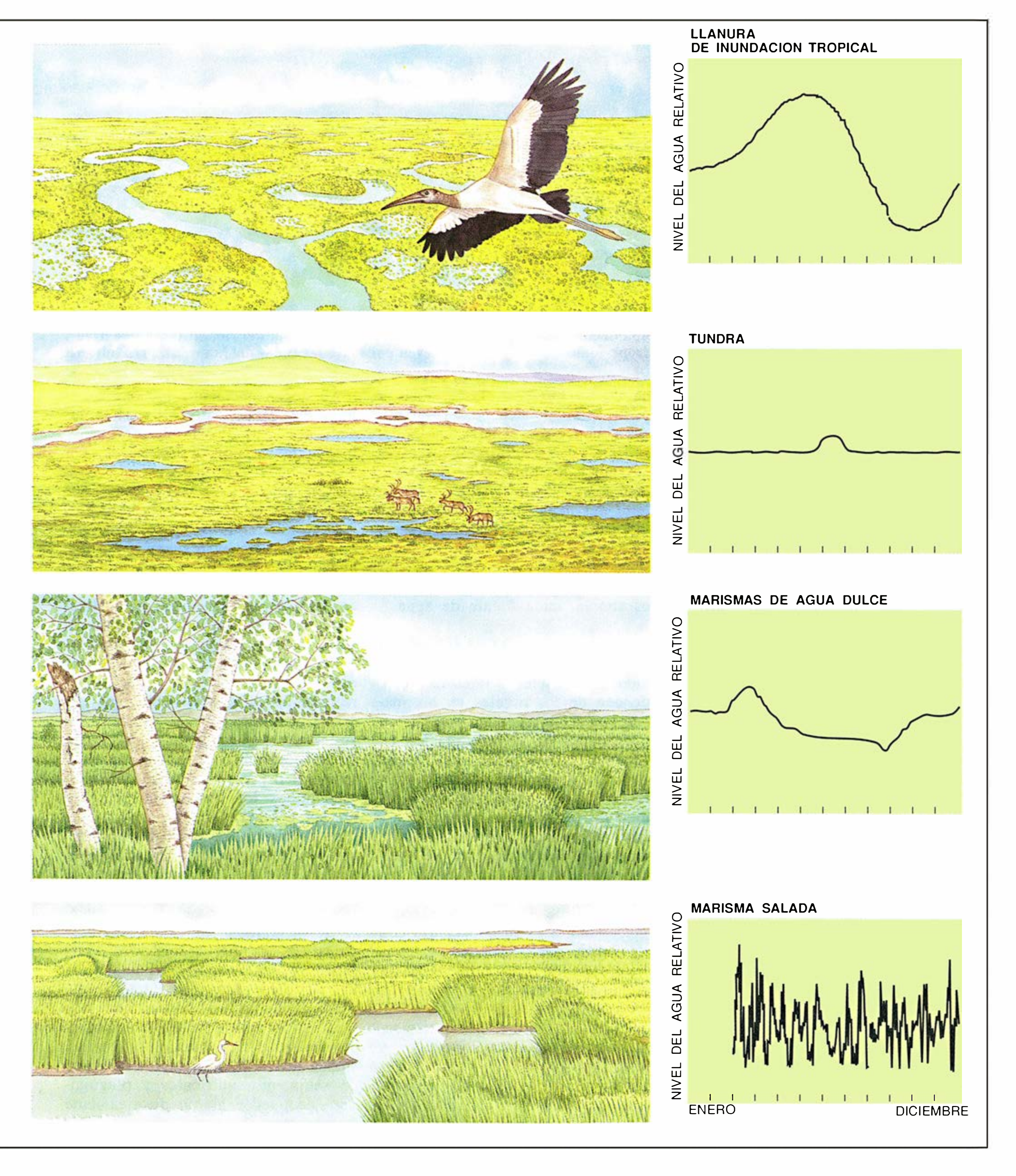


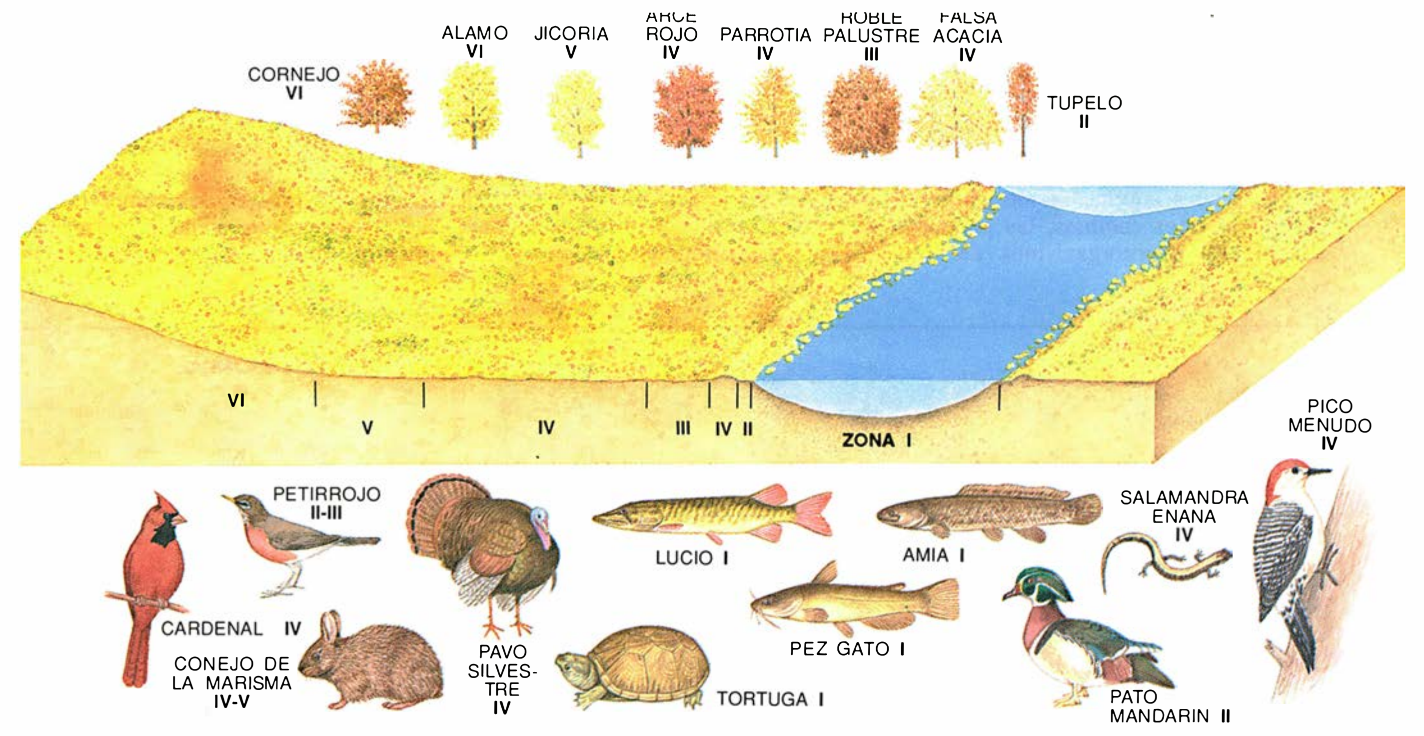




continuamente, algunas porciones de las zonas húmedas —y en ciertos casos el humedal entero— parecen unas veces sistemas acuáticos, otras sistemas terrestres y aún otras muestran caracteres intermedios de los dos. Siguiendo estos cambios, las plantas, animales y microorganismos de las zonas húmedas están constantemente adaptándose y cambiando.

Los humedales difieren de los lagos más profundos por su sensibilidad a los efectos de los cambios de nivel del agua. Un cambio de nivel de 30 cm en un lago sólo supone una pequeña diferencia en los límites físicos y funciones del sistema; pero un cambio equivalente puede afectar muy significativamente a las dimensiones y funciones de una zona húmeda. Ciertos tipos de vegetación —las plantas emergentes, las sumergidas y las flotantes— a menudo crecen en un lugar durante un año húmedo, en





2. ZONAS HUMEDAS BOSCOSAS de la parte baja de las cuencas de los principales ríos del sureste estadounidense: tienen dos períodos muy distintos durante el hidroperíodo. Durante la estación seca (*izquierda*), ciertos peces (así el pez gato) permanecen en el canal principal del río, en tanto que aves y otros se mueven por todas las zonas del humedal. Pero durante

otro lugar durante un año intermedio y no aparecen en absoluto durante un año seco. Así, en los humedales, los ciclos de crecimiento de las plantas pueden cambiar a lo largo del tiempo. En consecuencia, las clases de animales que frecuentan las zonas húmedas varían también.

Tales cambios explican la inmensa biodiversidad de las zonas húmedas. Las variaciones de nivel a lo largo del tiempo originan series de nichos ecológicos que pueden mantener plantas y animales terrestres, acuáticos y anfibios. Además, los gradientes verticales causados por los cambios en la profundidad del agua y en el grado de saturación del suelo crean mayor variabilidad ambiental. En los humedales se encuentran especies de ambos ambientes, acuático y terrestre.

Aunque su permanencia sea temporal, en las zonas húmedas un ambiente puede ser crucial para los patrones de nidificación, puesta, cría o alimentación de una especie. Las aves de patas cortas (garcillas y limícolas) se alimentan en aguas someras. Las de patas más largas (garcetas y garzas) se nutren en aguas menos superficiales. Las aves acuáticas nadadoras y buceadoras (ánade real y focha común) se alimentan en zonas abiertas de aguas más profundas. Los cambios en los niveles de agua sirven para desencadenar la nidificación de muchas aves en Florida y la reproducción de los patos en las lagunas de pradera.

Además de señalar el carácter interno de un humedal, las subidas y bajadas de nivel unen humedales entre sí y con otros ecosistemas acuáticos. Por su sensibilidad a los niveles de agua, los humedales dependen estrechamente de la cantidad y de la calidad del agua en sus inmediaciones. Fenómeno que resulta palmario en humedales aislados o de pequeñas dimensiones. En estos casos, la lluvia, la escorrentía local y los acuíferos son la única fuente de agua.

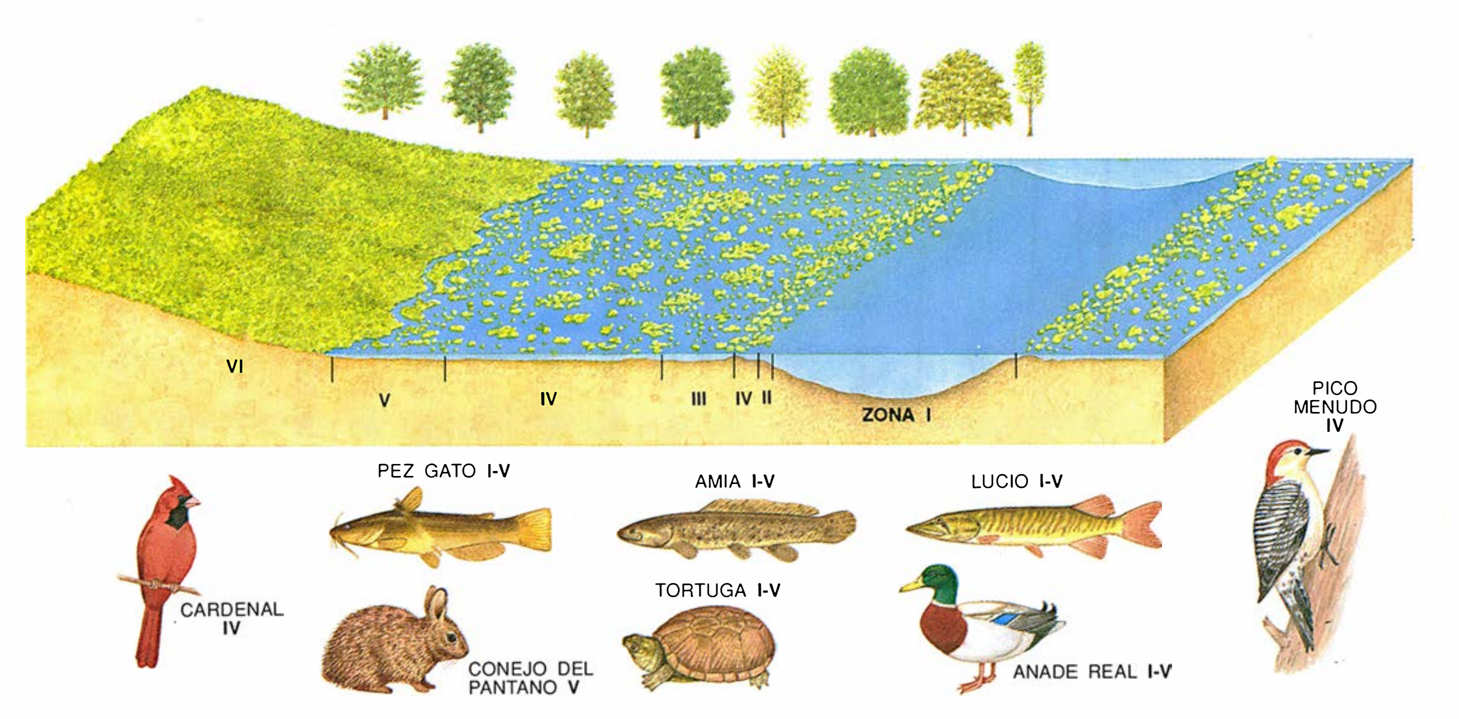
Las zonas húmedas que bordean los grandes lagos y ríos pueden ser menos sensibles a tales cambios. Dependen de los niveles en las masas de agua adyacentes, que, a su vez, dependen de la precipitación en su cuenca hidrográfica. Las zonas húmedas costeras son algo más elásticas ya que sus niveles de agua dependen de las mareas.

Tales asociaciones con los ambientes vecinos son decisivas para las funciones que cumplen. Las zonas húmedas servirán de lugares de reproducción o alimentación para algunas especies sólo si están conectadas con otras vías de agua. Más aún, el agua que entra en las zonas húmedas lleva nutrientes y sedimentos que promueven la productividad del sistema. Los humedales depuran estas aguas reteniendo sedimentos, así como fosfatos y otros compuestos químicos. Sustancias contaminantes, los nitratos por ejemplo, pueden convertirse en gases no dañinos por acción de bacterias aeróbicas y anaeróbicas que se encuentran allí.

La dependencia que muchas zonas húmedas tienen con los sistemas acuáticos contiguos las hace vulnerables a las actividades humanas, por triviales que éstas parezcan. La ocupación urbana y el bombeo de agua subterránea en la cuenca hidrográfica pueden alterarlas o destruirlas. Escombreras, diques u otras obras que aíslan unos humedales de otros cercanos o de otros ecosistemas acuáticos reducen su capacidad para almacenar agua y depurarla, así como la variedad de hábitats que albergan.

Cualquier tipo de barrera impide que plantas y animales acuáticos de requerimientos muy sensibles emigren arriba y abajo por las laderas. Sin suficiente espacio para evolucionar, el humedal entero puede desaparecer temporal o permanentemente. Algunos —incluidos los humedales ribereños en las cabeceras de los ríos y los humedales en depresiones y laderas— son propensos a tales interferencias. En una marisma costera, el levantamiento de un dique en su límite interno dificultaría el desplazamiento de la marisma tierra adentro ante un nivel del mar ascendente. Tales diques ponen en peligro muchas zonas costeras, en vez de protegerlas.

De zonas de las cuencas hidrográficas en las que tiene lugar un intenso desarrollo económico y social, suelen provenir cantidades crecientes de sedimento, nutrientes y plaguicidas que pueden alterar drásticamente la estructura biológica de una zona húmeda y sobrecargarla con sustan-



el período de inundación (*derecha*), el papel crucial del humedal como lugar de puesta y cría se hace evidente. Los peces penetran en el bosque anegado, donde frezan y se alimentan, y las aves acuáticas ocupan la zona inundada para nidificar. Plantas y animales del humedal boscoso están, pues, adaptados a ambos períodos del ciclo hidrológico.

cias contaminantes por encima de su capacidad de acumulación y depuración. Tales descargas pueden destruir un humedal en un corto plazo de tiempo. Los humedales aislados que se encuentran en depresiones topológicas son bastante vulnerables porque no son purgados periódicamente del sedimento acumulado por tormentas o por avenidas fluviales.

Muchas lagunas de las praderas y zonas glaciales en el norte de los Estados Unidos y en el sur de Canadá están expuestas a este riesgo. La mayoría de los humedales en estas regiones se formaron entre hace 8000 y 10.000 años al retirarse los glaciares. Con la retirada y fusión de los hielos, aparecieron las depresiones. Las más profundas se convirtieron en auténticos lagos; las someras, en zonas húmedas. En las épocas previas a la colonización, los alrededores de las lagunas de alta densidad vegetal suministraron cantidades pequeñas de sedimento y nutrientes a estos humedales; pero el aclarado de la vegetación aumentó este aporte de sedimento, que continúa acumulándose porque los ecosistemas no disponen de mecanismos efectivos de purga.

La disminución de los aportes de sedimentos fluviales por la retención que se efectúa en presas y embalses pone en peligro la existencia de otras zonas húmedas. En el delta del Mississippi, los taludes construidos han evitado que se depositen las descargas de sedimento transportado por el río —hasta el punto de que las marismas no pueden seguir su proceso de acreción a una tasa que compense la elevación del nivel del mar y la subsidencia del terreno. El resultado es una pérdida masiva, estimada en unas 10.000 hectáreas de marismas por año. De igual modo, el desarrollo abusivo de una cuenca hidrográfica y los trasvases de agua disminuyen el caudal de los ríos y ponen en peligro muchas zonas húmedas estuarinas al reducir la cantidad de agua dulce aportada y aumentar la salinidad.

No cuesta nada entender que los niveles de agua fluctuantes y las intrincadas relaciones entre los humedales y el desarrollo humano plantean serios retos a la política sobre el uso de zonas húmedas. Las reglas excesivamente generales suelen ser insensibles a las características físicas y dinámicas de los humedales.

Hasta cierto punto, la batalla sobre las zonas húmedas se ha planteado como un conflicto entre conservación y desarrollo. El debate ha girado en torno a las estrategias de gestión que satisfagan a los promotores del desarrollo (agrícola o urbanístico) sin dañar los humedales. A tal fin, deberán atenderse las fluctuaciones del nivel del agua y la extremada sensibilidad de los humedales a estos cambios, así como su dependencia de las unidades del paisaje que los rodean.

Los propietarios del suelo desean saber el alcance exacto de las reglamentaciones sobre humedales cuando construyen una casa o una carretera, y conocer qué actividades estarán permitidas, en qué áreas y bajo qué condiciones. Son partidarios de compensar la pérdida de zonas húmedas en un sitio con la restauración de zonas húmedas en otros lugares. Y quieren normas claras, sin sorpresas. Les gustaría, además, que la regulación no se supeditara al consejo de los biólogos.

Veamos, a modo de ejemplo, lo ocurrido con el proyecto de ley del Congreso norteamericano HR 1330, un caso de conflicto entre ciencia y legislación. De acuerdo con el proyecto, debe haber vegetación hídrica en el humedal para considerarlo como tal. También estipula que los humedales sean clasificados según una resolución que asigne el valor y función de un humedal de una vez y para siempre. En esencia, la HR 1330 trata a las zonas húmedas como sistemas acuáticos estáticos. Además, el proyecto deja a los propietarios de terrenos la capacidad de seleccionar el momento del año durante el cual decidir si un área constituye o no una zona húmeda. Ahora bien, puesto que, en la mayoría de los humedales, las plantas acuáticas pueden no estar presentes en un momento u otro, las disposiciones de este tipo podrían esgrimirse para negar la existencia de la mayoría de los humedales.

Este proyecto de ley exige que la administración deberá documentar



3. EVERGLADES DE FLORIDA, dañados por el huracán *Andrew*. Sus zonas húmedas confían en tales tormentas para su supervivencia. Los vientos extraen el exceso de materia orgánica y de sedimento que ahogan al ecosistema.

21 días de inundación o saturación de agua para cualquier humedal, norma de imposible cumplimiento porque apenas existen registros de nivel de agua de zonas húmedas y resulta extremadamente difícil predecir las fluctuaciones. Por último, el hablar de compensar la pérdida de un humedal si se conserva otro ignora la estrecha asociación entre ciertas funciones de los humedales y sus cuencas hidrográficas. El valor que tiene una zona húmeda para controlar el agua de inundación o mantener la calidad del agua se puede ver inmediatamente aguas abajo del mismo; sin embargo, de acuerdo con esa ley propuesta, si la zona húmeda desaparece, los propietarios de tierras localizadas más abajo no serían compensados por el hecho de que las otras zonas húmedas que las sustituyeran no pueden cumplir esas funciones. Además, y debido a las zonas que los rodean, dos humedales de similar tamaño pero en distinta localización pueden tener características muy diferentes, cumplir funciones diversas o la misma función con dispar intensidad y, por tanto, tener, desde este punto de vista, muy diferente valor.

No resulta fácil acordar una gestión de las zonas húmedas con fundamento científico que satisfaga a todo el mundo. Pero hay signos de esperanza. A lo largo de los diez últimos años, los ecólogos han profundizado en la definición y gestión de los humedales como unidades dinámicas en el paisaje. Este conocimiento podría formar la base de una política viable.

El reconocimiento del papel de las fluctuaciones del nivel del agua y la interrelación con el paisaje es el primer paso. Los niveles de agua fluctúan dentro de rangos bastante acotados en la mayoría de los humedales y pueden proporcionar una base para su definición y regulación. La información edafológica y geológica puede combinarse para descubrir cambios a largo plazo. Otros criterios pueden ayudar a reconocer humedales alterados o manipulados, así como los que sufren inundaciones muy irregulares. Además, conviene no olvidar el paisaje próximo cuando se evalúa una zona húmeda.

En el futuro, los procesos naturales deberían preservarse al máximo. Se ha pretendido controlar crecidas y sequías de los ríos construyendo presas. En el caso de que tales fluctuaciones naturales no puedan mantenerse, la gestión correctora debería ser llevada a cabo para simular los pulsos hidrológicos naturales.

El análisis regional de cuencas que aborde no sólo al presente, sino también situaciones futuras puede ayudar a definir las zonas húmedas. En este tipo de análisis podrían basarse la planificación y la regulación. Y debería integrarse la protección de tales sistemas en políticas generales del uso de la tierra, que abarcaran la gestión de los abastecimientos de agua, la de planicies inundables, el control de aguas torrenciales y la prevención de la contaminación.

Se han dado algunos pasos hacia una política con soporte científico. En 1971 la Convención de Ramsar, corroborada ya por 74 países, acordó la protección de los humedales y la formulación de planes nacionales para usarlos sabiamente. Hay 37 millones de hectáreas en 582 lugares que han recibido la designación de zonas Ramsar.

Debido a sus especiales características, los humedales plantean retos difíciles de protección y restauración, aunque no insuperables. Si se reconocieran estas características y se incorporasen en todos los niveles de los programas gubernamentales, se podrían salvar los humedales todavía existentes, de los trópicos a la tundra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WETLANDS: A THREATENED LANDSCAPE. Dirigido por Michael Williams. Basil Blackwell, 1991.

WETLANDS. Dirigido por M. Finlayson y M. Moser. Facts on File, 1991.

WETLANDS. William J. Mitsch y James G. Gosselink. Van Nostrand Reinhold, 1993.

WETLANDS IN DANGER: A WORLD CONSERVATION ATLAS. Dirigido por Patrick Dugan. Oxford University Press, 1993.

Humedales, el signo del progreso

El hecho de que las características físicas, químicas y biológicas de los humedales fluctúen tan intensamente es consecuencia de la elevada relación superficie/volumen de sus aguas. Se trata de ecosistemas acuáticos someros; por tanto, pequeñas variaciones en algunas de las variables que determinan el balance de agua (lluvia, evapotranspiración, aportes y pérdidas por escorrentía superficial y flujos subterráneos) provocan grandes variaciones de la superficie cubierta por agua que, si ocurren inducidas por los cambios climáticos, muestran su gran heterogeneidad temporal y espacial.

Bajo el clima mediterráneo, las fluctuaciones del nivel del agua en los humedales son muy extremas y más irregulares que con otros regímenes climáticos. En las estaciones más secas del año, muchos humedales interiores y costeros se secan total o parcialmente. Por la misma razón, la variabilidad climática, se pueden inundar rápida o lentamente, según como tengan lugar las lluvias.

Cualquier plan de gestión de estos ecosistemas debería tender a mantener las fluctuaciones naturales del nivel del agua. Existen numerosos ejemplos de humedales en los que se ha estabilizado el nivel del agua (laguna de Sariñena) y en los que se ha alterado su hidroperíodo (lagunas costeras del delta del Ebro). Las consecuencias de estas perturbaciones, ocasionadas por vertidos de aguas residuales y desviaciones de flujos de agua, han sido claras y siempre del mismo tipo: pérdidas inmensas de recursos naturales —entre ellos de las pesquerías y de la calidad del agua.

En regiones áridas y semiáridas, las charcas de reducidas dimensiones son indicadoras de flujos de agua subterránea que pueden tener alcance incluso regional, y albergan especies vegetales y animales que pueden reportar grandes beneficios a la humanidad

Los humedales deben entenderse como parte integrante del paisaje. Sus variaciones temporales y espaciales son indicadoras de la dinámica de un sistema más amplio que abarca la cuenca hidrográfica superficial y subterránea. Esta fue, en síntesis, la contribución de los últimos años de trabajo de Fernando González Bernáldez (*véase* "Las aguas subterráneas en el paisaje" por F. González Bernáldez y cols.; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1987). Desafortunadamente, esta percepción no se tuvo en cuenta durante los años 70 y 80 y, hoy en día, zonas húmedas protegidas legalmente, como las Tablas de Daimiel y Doñana, presentan su ciclo hidrológico gravemente alterado por las extracciones de agua subterránea para riego de cultivos de rentabilidad perecedera, o nula, si se considera el alto coste ambiental que supone la puesta en regadío de áreas conectadas hidrológicamente con zonas húmedas de gran valor. En este sentido, el paso del tiempo no supone ningún progreso, porque en otras zonas, como los Monegros, se evidencia la misma falta de integración de los conocimientos científicos en la planificación del desarrollo.

Otro ejemplo ilustra la falta de aplicación de los conocimientos científicos en la planificación de la gestión hidrológica. Frente a las avenidas de agua de gran caudal y baja frecuencia por los cauces fluviales, se manejan dos argumentos para justificar grandes obras públicas que incrementarían aún más las regulaciones artificiales de los caudales: el agua que llega al mar se pierde sin utilidad y las inundaciones de las llanuras aluviales provocan graves pérdidas. Ambas razones son falsas. Está demostrado que los aportes de agua continental al mar contribuyen a la riqueza pesquera de las zonas próximas a las desembocaduras. La disminución de estos aportes también ha ocasionado el desequilibrio a favor de la erosión de gran parte de la líneas de costa del mar Mediterráneo, y para intentar remediarla se está derrochando muchísimo dinero. Las graves pérdidas por inundación de zonas próximas a los cauces de los ríos no lo serían tanto, ni los esfuerzos de contención de las riadas tan grandes ni frecuentes, si se hubieran preservado las zonas húmedas de las llanuras aluviales que cumplirían la función, entre otras, de amortiguación de las riadas (fundamentalmente rebajando la onda de la avenida y alargando su período). No es extraño que los tramos donde ocurren los mayores daños sean los anteriores y posteriores a la existencia de diques que estrechan el cauce fluvial, ya que representan un freno para el paso de la avenida y el agua sale de ese estrecho pasillo con mucha mayor energía.

Afortunadamente, la mayoría de estos procesos dinámicos son bien conocidos en sus componentes más sencillos. Durante todo el siglo XX se han usado las mismas bases conceptuales para la planificación de la política hidráulica (y sus técnicas derivadas, canalización, embalsado y trasvase de agua) que se heredaron de la Edad Media, pero que aplicadas hoy constituyen un enorme gasto por la acumulación desequilibrada en el espacio de las actividades humanas y poca rentabilidad a largo plazo por la irregularidad en el tiempo de las estructuras económicas. Existen métodos de gestión hidráulica alternativos a los tradicionales que tienen en cuenta el principio de aceptar pérdidas, o su equivalente de evitar grandes gastos, a corto plazo para asegurar buenos rendimientos, o su equivalente de mayor seguridad en el rendimiento sostenido, a largo plazo. Estos métodos requieren una gran integración de los trabajos de ingeniería en la conservación de procesos y áreas naturales.

La preservación de las zonas húmedas manifestando todas sus características ofrece el signo más genuino del progreso humano, un progreso basado en la aplicación de los conocimientos científicos para obtener un bienestar más duradero. Signos positivos se observan en los esfuerzos por aplicar las recomendaciones del Convenio de Ramsar. Pero la falta de atención a propuestas de alcance europeo, como la Declaración de Grado (febrero de 1991) o el desarrollo de políticas sectoriales desconectadas y sin integrar en un objetivo común de reequilibrio del uso del territorio, a través de la promoción de una economía de rendimientos más duraderos y preservadora de los recursos naturales, son signos negativos que amenazan la persistencia de numerosos humedales mediterráneos más allá del siglo XX. (*Francisco A. Comín, departamento de ecología de la Universidad de Barcelona.*)

Diversidad lingüística del mundo

Colonizadores, agricultores, mercaderes y conquistadores llevaron las lenguas precursoras de las actuales a los territorios donde hoy se hablan. Los estudios multidisciplinares nos revelan el papel respectivo de cada grupo

Colin Renfrew

Narra el historiador griego Herodoto que Psamético, faraón egipcio del siglo VII a. C, dispuso el aislamiento de dos recién nacidos hasta que se pudieran oír juntas sus primeras palabras. La primera expresión que articularon fue *bekos*, palabra que, según descubrieron los escribas del faraón, significaba pan en frigio, lengua que se hablaba en Anatolia. Concluyeron así que el frigio era la lengua original de la Tierra. Tan caprichoso experimento marcó, tal parece, la pauta de las investigaciones posteriores. En el siglo XIX las hipótesis sobre el origen de la lengua habían quedado vacías de significado, hasta el extremo de que la Société Linguistique de París prohibió abordar el tema en sus sesiones.

Hoy día, el avance de la arqueología, la genética y la propia lingüística está abriendo una vía plausible de explicación de la diversidad de lenguas. Muchos aspectos del problema constituyen todavía objeto de debate y cualquier intento de síntesis sólo puede ser provisional, pero empiezan ya a discernirse los rasgos generales del proceso de evolución de las lenguas.

La historia proporciona un cimiento seguro para crear una hipótesis razonable. Durante más de 200 años, los lingüistas han reconocido que algunas lenguas tienen tales semejanzas en vocabulario, gramática, formación de palabras y uso de los sonidos, que deben provenir de un antecesor común. Llaman familias lingüísticas a esas vinculaciones ancestrales. La más famosa de las primeras clasificaciones fue emprendida en 1786 por sir William Jones, juez del Tribunal Supremo de Calcuta, quien advirtió relaciones de parentesco entre el sánscrito, el griego, el latín, el gótico y el persa. Palabras y rasgos gramaticales le sugirieron la idea de que las lenguas habían "brotado de una fuente común", la hoy llamada familia indoeuropea.

COLIN RENFREW rige la cátedra Disney de la Universidad de Cambridge y preside el Instituto McDonald de Investigación Arqueológica. Ha dirigido excavaciones en Grecia y las islas Británicas.

Las generaciones posteriores han refinado y elaborado los métodos analíticos que empleó Jones. La lingüística histórica, nacida de la investigación indoeuropeística, compara sistemáticamente las lenguas que pertenecen a una familia. El cotejo permite reconstruir una hipotética lengua precursora, o protolengua.

La inferencia de filogenias a partir de datos observados en el presente es un problema que volvemos a encontrarlo en biología evolutiva. Los biólogos se han venido esforzando por reconstruir los parentescos entre especies a través de la anatomía y fisiología. En los últimos decenios, la búsqueda se ha generalizado hasta el dominio molecular, donde se descifra la línea de descendencia de secuencias específicas de nucleótidos de ADN. En cada caso, el estudio sistemático engendra una clasificación taxonómica, basada en la observación. Se trata de una clasificación fenética, fundada en la morfología general.

A menudo, la semejanza relativa de las unidades taxonómicas puede representarse en un diagrama dendriforme. Desde Charles Darwin, muchos cultivadores de disciplinas históricas, la lingüística histórica y la paleontología entre ellas, han tendido a confundir ese árbol con el proceso evolutivo que condujo hasta la situación presente. En otras palabras, han equiparado el árbol fenético con el filogenético.

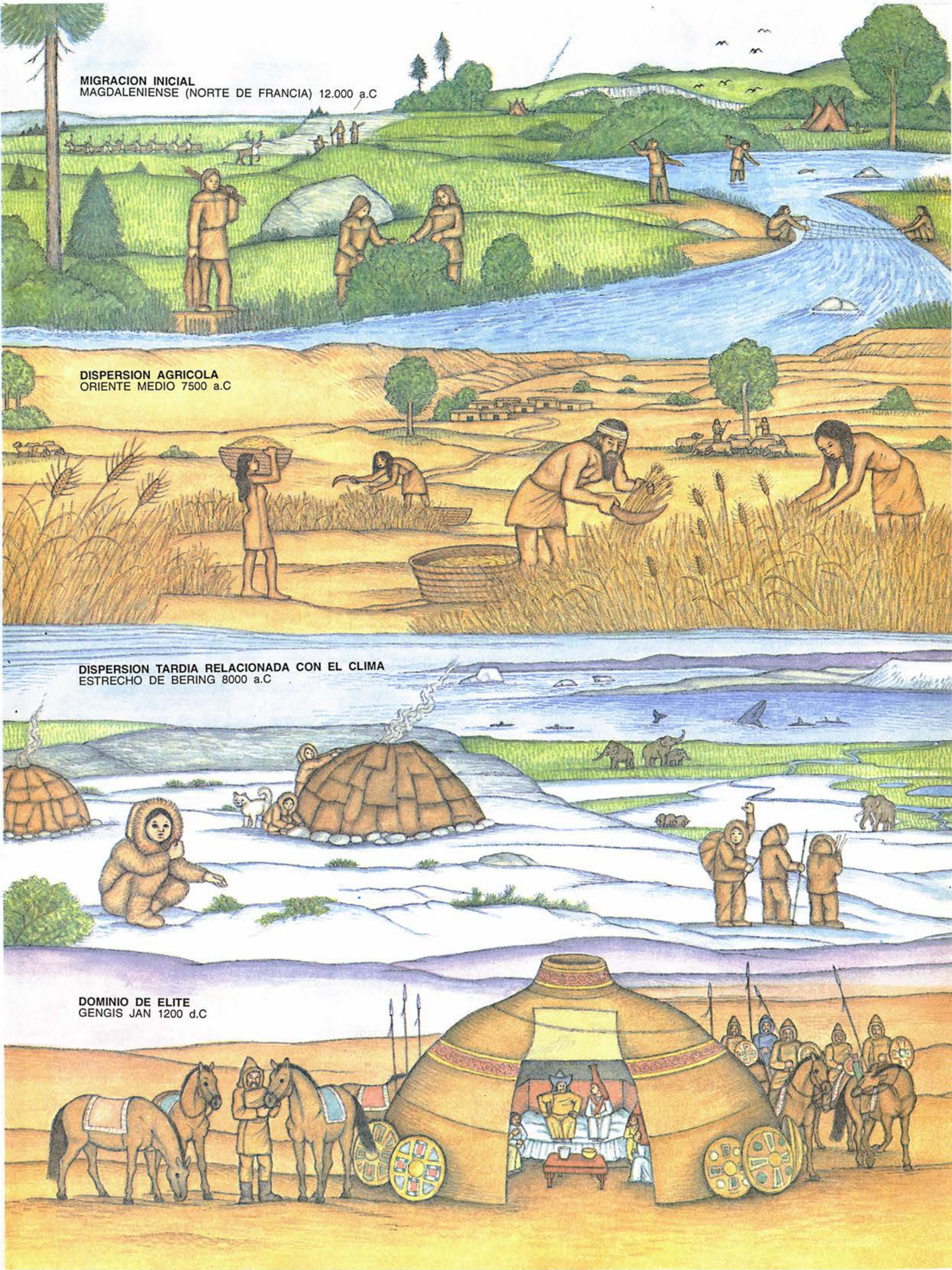
Semejante identificación se apoya en la fuerza de varios supuestos centrales. El más importante es que el cambio evolutivo procede con una cadencia regular y constante. Con el paso del tiempo, las formas que han llegado a separarse van divergiendo regularmente una de otra y surgen las innovaciones en el vocabulario.

La hipótesis de un ritmo de cambio bastante uniforme resulta decisiva, pues la transformación diferencial oscurece el modelo de ramificación. Citemos, a modo de ejemplo, el danés. Imaginemos que se hubiera separado del inglés y el alemán antes de que estas dos lenguas divergieran. La filogenia real colocaría en una rama el inglés y el alemán y, en otra, el danés. Si el alemán y el danés se hubieran alterado poco, mientras que el inglés hubiera cambiado mucho, un lingüista sin otros puntos de referencia podría ubicar erróneamente el alemán y el danés juntos, separados del inglés.

Otro supuesto de entrada tiene que ver con la descendencia compartida; de acuerdo con el mismo sería ésta, y no factores independientes que fuerzan la convergencia, la que explicaría las semejanzas. En el contexto lingüístico, se produce convergencia cuando lenguas contemporáneas se influyen mutuamente a través del préstamo de palabras, frases y formas gramaticales. El uso en Europa de la expresión norteamericana "O.K." es un ejemplo de convergencia. Como el préstamo rara vez afecta a los elementos básicos de una lengua, los expertos suelen detectarlo, si bien el problema radica en el establecimiento de normas de comprobación.

Dentro de la disciplina de la lingüística, el entusiasmo por una visión universal de la evolución del lenguaje dista mucho de ser unánime. Durante años han coexistido dos escuelas antagónicas: los "fragmentadores" y los "aglutinadores". Los primeros tienden a destacar las diferencias que anulan el posible parentesco de las lenguas; propenden a fragmentar la clasificación en

1. DISEMINACION DE LAS LENGUAS a través de cuatro procesos (*de arriba abajo*): migraciones iniciales, expansiones demográficas de agricultores, incursiones tardías en el subártico y conquista de extensos territorios.


MIGRACION INICIAL
MAGDALENIENSE (NORTE DE FRANCIA) 12.000 a.C
DISPERSION AGRICOLA
ORIENTE MEDIO 7500 a.C
DISPERSION TARDIA RELACIONADA CON EL CLIMA
ESTRECHO DE BERING 8000 a.C
DOMINIO DE ELITE
GENGIS JAN 1200 d.C

unidades pequeñas e independientes. En su esfuerzo para descartar parentescos espurios, los fragmentadores exigen que ningún grupo de lenguas se clasifique como una familia hasta no haberse demostrado que existe una serie de semejanzas y afinidades entre ellas. Insisten también en que se usen esas correspondencias para reconstruir la protolengua originaria de la supuesta familia. Los aglutinadores, por su parte, aceptan criterios que les permitan agrupar muchas lenguas en unas pocas familias y, aunque algunos reconstruyen protolenguas, otros consideran superflua esa fase.

Varias familias de lenguas han ganado amplia aceptación; son la indoeuropea, la afro-asiática (antes camito-semítica), que comprende las lenguas semíticas y la mayoría de las lenguas del norte de Africa, y la familia urálica, que incluye el finés y el húngaro. Menos clara está la legitimación de otras agrupaciones.

En 1963 Joseph H. Greenberg, de la Universidad de Stanford, dio un paso significativo hacia una visión unificada al clasificar las lenguas de Africa en cuatro macrofamilias dominantes: la afro-asiática, la khoisán, la níger-cordofana y la nilo-sahariana. No emprendió la reconstrucción histórica por medio del método comparativo, que muchos lingüistas hubieran preferido, sino que operó mediante un sistema de análisis multilateral. Este método permite examinar simultáneamente un conjunto de palabras en muchas lenguas, en vez de limitarse a compararlas en sólo un par.

Pese a las reservas de los fragmentadores, muchos investigadores han seguido la clasificación de Greenberg para Africa. El mismo autor aplicaría luego idéntico procedimiento a las lenguas del continente americano, identificando tres familias importantes, o macrofamilias. Dos de ellas, la esquimo-aleutiana y la na-dené, han encontrado amplio apoyo; en cambio, la tercera categoría, la "amerindia", que incluye la mayoría de las lenguas indígenas americanas en una sola macrofamilia, ha sido muy criticada.

En mi condición de arqueólogo, prefiero abstenerme de juzgar la validez de estas macrofamilias, así como la de otras defendidas por Merritt Ruhlen, un convicto aglutinador. Me limito a señalar las que son controvertidas, dejando abierta la cuestión de su naturaleza mientras intento resolver un rompecabezas más concreto: ¿cómo se produjo esa distribución? En los últimos años se ha empezado a conformar una respuesta gracias a dos avances arqueológicos, uno relativo a la evolución de nuestra especie, el otro a la de nuestra cultura.

Sabemos mucho más ahora sobre los primeros homínidos que hace veinte años. Nadie duda que fue en Africa, hace unos cuatro o cinco millones de años, donde apareció *Australopithecus*. También en Africa, hace alrededor de 1,6 millones de años, evolucionó el antepasado de todos nosotros, *Homo erectus*, quien se dispersó por Asia y Europa y del que se han encontrado fósiles y objetos en ambos continentes. Nuestra propia especie, *Homo sapiens*, se separó con toda seguridad de *H. erectus* y alcanzó su forma actual —*H. sapiens sapiens*— hace más de 100.000 años.

La mayoría de los arqueólogos admiten que este proceso aconteció exclusivamente en Africa. Una teoría alternativa sostiene que el proceso de transición de *H. erectus* a *H. sapiens* no estuvo restringido a Africa, sino que tuvo lugar en un área más amplia, que abarcó Asia y, quizás, Europa. Pero las pruebas genéticas respaldan la hipótesis del "origen africano". Siguiendo esta opinión, por tanto, podemos concebir la aparición de *H. sapiens sapiens* en Africa hace unos 100.000 años con la dispersión gradual de nuestra especie por el Viejo Mundo. Hace unos 40.000 años, pueblos modernos habían colonizado el Mediterráneo oriental, sur de Asia, Europa, Asia central y oriental, Nueva Guinea y Australia. Hace quizá tan sólo 37.000 años —y no más de 16.000— exploradores asiáticos habían atravesado el estrecho de Bering e iniciado la colonización del Nuevo Mundo. Debemos suponer que todos esos pobladores hablaban una o varias lenguas, aunque no cómo eran.

El segundo avance arqueológico importante de los últimos años es el énfasis puesto en los mecanismos del cambio cultural. En particular, los arqueólogos ya no están dispuestos a explicar cualquier alteración surgida en las primeras etapas de la cultura humana como consecuencia de alguna migración mal definida. Han abandonado la ecuación simplista establecida entre una lengua, una cultura y un "pueblo". Si se va a utilizar una migración para explicar un cambio del arte decorativo, la aparición de un nuevo sistema religioso o el surgimiento de una lengua nueva, debe haber alguna prueba de parentesco y comprenderse los procesos económicos y sociales que la indujeron.

Existen cuatro procesos principales por los que una lengua puede llegar a hablarse en un territorio: la colonización inicial de una región no ocupada; la divergencia (tratada antes); la con-

Así se diseminaron las lenguas

MIGRACION INICIAL

Al parecer, los primeros humanos empezaron a diseminarse desde Africa hacia el resto del mundo hace unos 100.000 años. Las huellas lingüísticas supervivientes de esta migración son el vasco, el caucásico, el koisán, el australiano, el "indo-pacífico" y el "amerindio".

DISPERSION AGRICOLA

La invención de la agricultura en varios lugares provocó la expansión de las poblaciones. En consonancia con ello, las lenguas originales de los agricultores se diseminaron y diversificaron hasta formar grandes familias como el indoeuropeo, el sino-tibetano, el austronesio y el afro-asiático.

DISPERSION TARDIA RELACIONADA CON EL CLIMA

El calentamiento global de hace varios miles de años abrió las regiones situadas al norte del paralelo 54 a exploradores cuyas lenguas se desarrollaron en las familias conocidas como uraloyucáguira, chucuto-camchatca, esquimoaleutiana y na-dené.

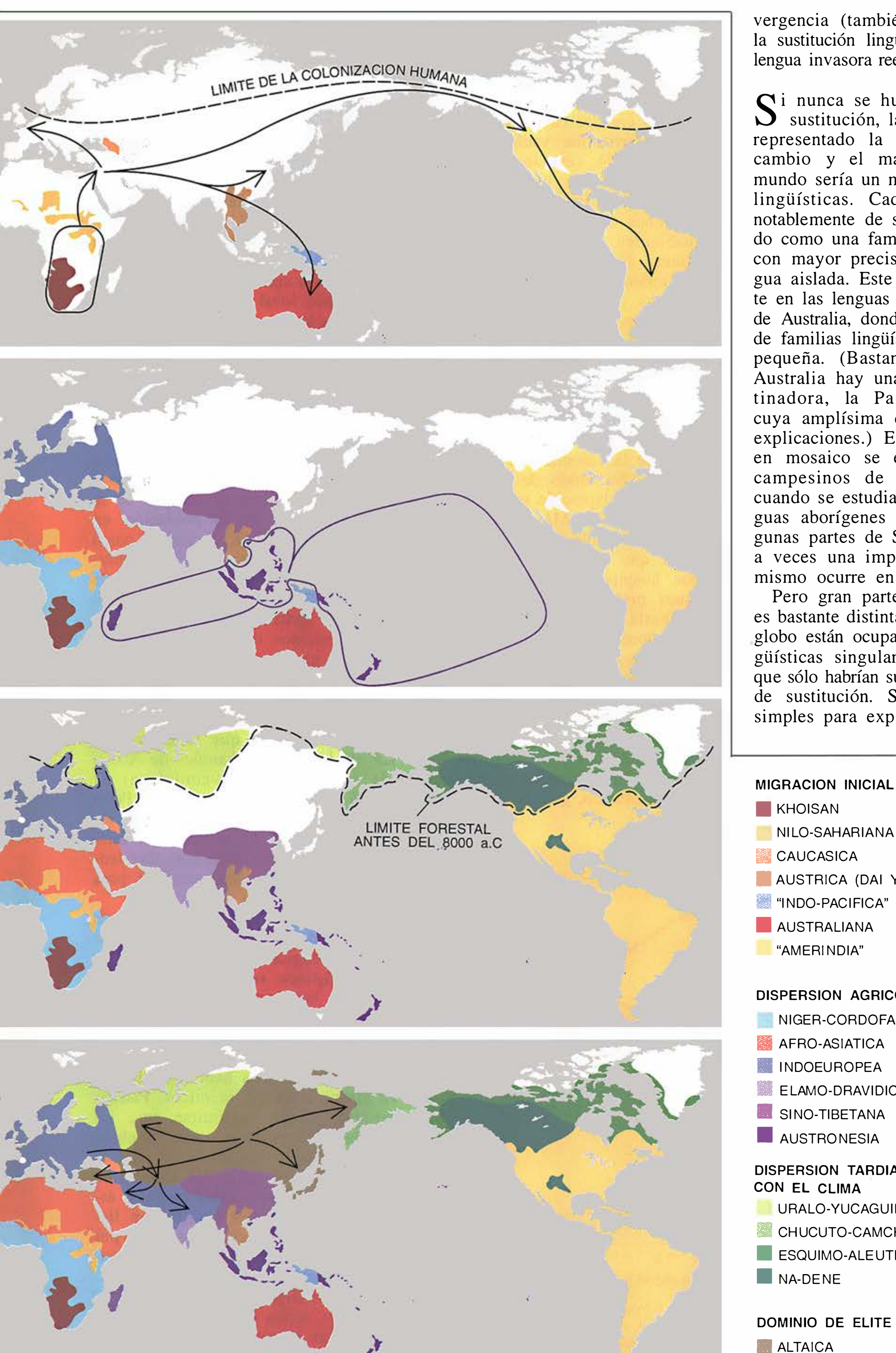
DOMINIO DE ELITE

El desarrollo de sociedades complejas permitió que minorías invasoras conquistaran otras poblaciones y les impusieran sus lenguas. Así se expandió la familia altaica, igual que determinados miembros de familias existentes con anterioridad, como la indoeuropea y la sino-tibetana.

vergencia (también tratada antes), y la sustitución lingüística, en la que la lengua invasora reemplaza a la original.

Si nunca se hubiera producido la sustitución, la divergencia habría representado la causa principal de cambio y el mapa lingüístico del mundo sería un mosaico de unidades lingüísticas. Cada lengua diferiría notablemente de sus vecinas, figurando como una familia independiente o, con mayor precisión, como una lengua aislada. Este mosaico es evidente en las lenguas aborígenes del norte de Australia, donde un número grande de familias lingüísticas ocupa un área pequeña. (Bastante más al sur de Australia hay una sola familia aglutinadora, la Pama-Nyungan, para cuya amplísima distribución no hay explicaciones.) Este tipo de modelo en mosaico se encuentra entre los campesinos de Nueva Guinea. Y cuando se estudian los mapas de lenguas aborígenes de California y algunas partes de Suramérica, se tiene a veces una impresión parecida. Lo mismo ocurre en el Cáucaso.

Pero gran parte del mapa mundial es bastante distinta. Extensas áreas del globo están ocupadas por familias lingüísticas singulares, del tipo de las que sólo habrían surgido por un proceso de sustitución. Sugiero tres razones simples para explicar este modelo.



MIGRACION INICIAL
- KHOISAN
- NILO-SAHARIANA
- CAUCASICA
- AUSTRICA (DAI Y AUSTRO-ASIATICA)
- "INDO-PACIFICA"
- AUSTRALIANA
- "AMERINDIA"

DISPERSION AGRICOLA
- NIGER-CORDOFANA
- AFRO-ASIATICA
- INDOEUROPEA
- ELAMO-DRAVIDICA
- SINO-TIBETANA
- AUSTRONESIA

DISPERSION TARDIA RELACIONADA CON EL CLIMA
- URALO-YUCAGUIRA
- CHUCUTO-CAMCHATCA
- ESQUIMO-ALEUTIANA
- NA-DENE

DOMINIO DE ELITE
- ALTAICA

En primer lugar, unas pocas familias han alcanzado su extensión actual en virtud del dominio de élite. Vale decir: una minoría invasora se hace con el control de los resortes del poder y se eleva a la categoría de aristocracia, dando tal prestigio a su lengua que induce al pueblo aborigen a adoptarla por encima de la suya propia. Estos relevos de mando por una minoría implican que el grupo invasor se presenta con una organización más o menos centralizada, por lo que dicha hipótesis sólo puede aplicarse a las épocas prehistóricas tardías o a los tiempos históricos, cuando ya se habían constituido sociedades muy jerarquizadas.

Por ejemplo, en el sur de China el chino no se adoptó hasta tiempos históricos, a través de la expansión militar del imperio chino. La propagación europea del latín se ajusta también a ese cuadro; otro tanto cabe decir de la difusión de las lenguas indoeuropeas por Irán, el norte de India y Paquistán, atribuible al auge del pastoreo nómada en el segundo milenio a. C. Las lenguas altaicas empezaron a dominar Asia central durante el medievo, cuando guerreros a caballo asolaron la región.

La mayoría de las familias lingüísticas que abarcan áreas extensas pueden considerarse, sin embargo, producto de dos tipos diferentes de dispersiones de población, ocurridos después del último período glacial hace unos 10.000 años. Las dispersiones entrañaron la introducción de la agricultura, por un lado, y la penetración en áreas deshabitadas a raíz de los cambios climáticos, por otro.

Las recientes dispersiones relacionadas con los cambios climáticos poblaron territorios vacíos al norte del paralelo 54, cerrados a toda habitación durante la última fase fría del Pleistoceno. Es muy probable que las regiones donde encontramos ahora hablantes de lenguas esquimo-aleutianas fueran ocupadas hace escasos milenios. Las lenguas uralo-yucáguiras y chucoto-camchatcas se habrían asentado en sus territorios actuales antes de esa fecha.

El caso de las lenguas na-dené parece más complicado. Como sugiere Greenberg, es probable que llegaran a Norteamérica antes que los esquimo-aleutianoparlantes, pero mucho después de la colonización inicial del continente. Su modo de vida representaba una adaptación temprana a la vida en la tundra. Más tarde, cuando los factores ecológicos o climáticos hicieron que este área les resultara menos hospitalaria, bajarían al sur. Algunos proto-na-dénéparlantes arribaron hasta Arizona o Nuevo México. El dominio de élite, reforzado por la domesticación del caballo, explica la presencia de culturas relacionadas con este grupo lingüístico por gran parte del continente.

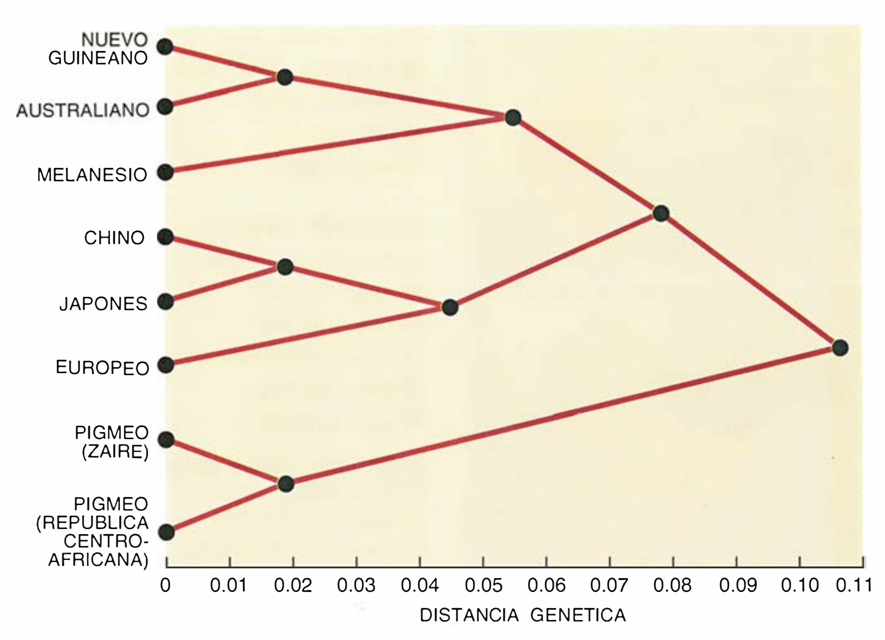
El factor individual más importante en el desarrollo de las familias lingüísticas de áreas amplias parece haber sido la sustitución, gracias a la expansión de la agricultura. De acuerdo con esta teoría, una familia lingüística comenzaría su andadura siendo una sola lengua, hablada por campesinos incipientes (o "forrajeros") que habitan un ecosistema donde hay plantas (y quizás animales) domesticables. Esos campesinos desarrollan una cultura agrícola que los mantiene en un hábitat sedentario, lo que favorece un índice mayor de natalidad, una tasa baja de mortalidad infantil y una producción de alimentos más intensa. La densidad de población crece, garantizando así el predominio local de los agricultores y su lengua.

En algunos casos, los cultivos y rebaños domesticados, así como las técnicas para su administración, serían transplantables a nuevos nichos ecológicos. En tales circunstancias, la lengua o lenguas del área nuclear se transmitirían junto con las plantas y animales domésticos. Las lenguas irían extendiéndose al compás de la lenta expansión de la población en una ola de avance, conocida como difusión démica. Una posibilidad alternativa consistiría en que la lengua de los agricultores, junto con la nueva economía agrícola, fuera adoptada por grupos vecinos de cazadores-recolectores, en un proceso de aculturación. Los efectos genéticos difieren bastante de un procedimiento a otro.

Suele aceptarse que la expansión de las lenguas bantúes de Africa (de la familia níger-cordofana) se apoyó en la difusión démica. Peter Bellwood, de la Universidad Nacional Australiana, ha utilizado el mismo argumento no sólo para las lenguas polinésicas, sino también para las austronesias en general.

He defendido esta posibilidad y la he razonado con cierto detenimiento para las lenguas indoeuropeas de Europa. Algunos sostienen que en el noroeste europeo el proceso no se debió tanto a los movimientos de población cuanto a la aculturación, aunque, de haber sido cierto, los efectos lingüísticos habrían resultado en última instancia idénticos. Parejas razones pueden esgrimirse para las lenguas afro-asiáticas, quizá también para las élamo-dravídicas, y para la propagación inicial de las altaicas en Asia. Desde luego, estas lenguas, especialmente las túrcicas, fueron llevadas después mucho más lejos por el dominio elitista de pastores nómadas a caballo.

C. F. W. Higham, de la Universidad de Otago, acaba de sugerir que, para las lenguas austro-asiáticas del sureste asiático (munda y mon-khmer), valdrían argumentos semejantes. Este gru-



2. ARBOLES GENEALOGICOS derivados de las frecuencias génicas, construidos para varias poblaciones del mundo. Esas estructuras ramificadas constituyen un cuerpo independiente de pruebas con el que comparar los modelos de la prehistoria propuestos por la lingüística, la arqueología y la antropología. El árbol aquí ilustrado se basa en el trabajo realizado por el grupo de Joanna L. Mountain.

Método de comparación multilateral

Una simple comparación del vocabulario básico revela grandes agrupamientos lingüísticos, como las ramas germánica, itálica y eslava del indoeuropeo, el uralo-yucáguir y el vasco.

GRUPO LINGÜISTICO	LENGUA	UNO	DOS	TRES	CABEZA	OJO	NARIZ	BOCA
GERMANICO	SUECO	en	tvo	tre	hyvud	øga	næsa	mun
	HOLANDES	ēn	tvē	drī	hōft	ōx	nø̄s	mont
	INGLES	wən	tuw	thrij	hɛd	aj	nowz	mawth
	ALEMAN	ajns	tsvaj	draj	kopf	augə	nāze	munt
ITALICO	FRANCES	œ̃/æ̃	dø	tRwa	tɛt	œj	ne	buš
	ITALIANO	uno	due	tre	tɛsta	ok̄jo	naso	bok̄a
	ESPAÑOL	uno	dos	tres	kabesa	oxo	naso	boka
	RUMANO	un	doj	trej	kap	okj	nas	gurə
ESLAVO	POLACO	jeden	dva	tši	glova	oko	nos	usta
	RUSO	adin	dva	tri	galava	oko	nos	rot
	BULGARO	edin	dva	tri	glava	oko	nos	usta
URALO-YUCAGUIR	FINES	yksi	kaksi	kolme	pǟ	silmæ	nenæ	sū
	ESTONIO	yks	kaks	kolm	pea	silm	nina	sū
VASCO	VASCO	bat	bi	hiryr	byry	begi	sydyr	aho

FUENTE: *Merritt Ruhlen*

po está asociado con un foco del sureste asiático de domesticación del arroz. La expansión de las lenguas sino-tibetanas parece haberse hallado vinculada inicialmente a la domesticación del mijo y otros cereales en el valle del río Amarillo y sólo más tarde a la del arroz.

La argumentación en favor de una expansión agrícola de esta clase debe pormenorizarse en cada caso. Tales pesquisas caen dentro de la competencia de la arqueología. En general, podemos casi siempre determinar el área originaria de una planta o un animal y establecer la fecha aproximada de domesticación, así como documentar los registros materiales del proceso de dispersión. Las consecuencias lingüísticas son, por supuesto, una cuestión de inferencia: las lenguas prehistóricas no han dejado huellas en el registro arqueológico.

Las fechas de estas dispersiones agrícolas, cada vez mejor establecidas por la datación de radiocarbono, anteceden bastante a las que los lingüistas suelen asignar a la fase inicial de las familias lingüísticas correspondientes. Ahora bien, nunca se ha establecido de manera tajante la base lógica de la datación lingüística: no existe sistema fiable alguno para realizar una datación independiente de las protolenguas.

¿Y qué ocurre con las familias lingüísticas que no se expandieron como consecuencia del desplazamiento de los pueblos impulsado por un cambio climático, una revolución agrícola o una ola de conquista? Estas lenguas residuales, esparcidas a retazos por todo el mapa, llegaron a sus zonas de distribución actuales hace mucho, durante la dispersión inicial de los humanos modernos. Entre esas familias se numeran las lenguas khoisán y nilo-saharianas de Africa, las lenguas caucásicas del norte y el sur; el vasco, las lenguas australianas, el mosaico de lenguas, quizá no emparentadas mutuamente, de Nueva Guinea ("indo-pacífico") y las lenguas pre-na-dené del continente americano. Esta última categoría abarca varias subfamilias cuya distribución ha quedado determinada en su mayor parte por procesos subsiguientes, entre ellos la expansión agrícola.

La genética molecular puede someter a prueba algunos elementos, al menos, de esta explicación general de la distribución de las lenguas de la Tierra. Para abordar esa cuestión se comparan las frecuencias génicas de varias poblaciones y se convierten los resultados en un árbol, cuyas ramas representan la distancia genética. Se puede ver entonces hasta qué punto las relaciones genéticas confirman las predicciones surgidas de la explicación anterior. De momento, la teoría de una dipersión desde Africa de nuestra propia especie recibe un sólido respaldo del árbol genealógico construido a partir de un muestreo del ADN nuclear de varias poblaciones vivas.

Las dispersiones iniciales de población por un territorio deshabitado suponen una transferencia génica total. Las dispersiones agrícolas arrastrarán un flujo génico significativo sólo cuando se producen por difusión démica; las que se propaguen por un proceso de aculturación dejarán huellas genéticas más leves. Por su lado, la sustitución lingüística por dominio elitista acarrea flujo genético en una escala muy limitada: en tales casos, suelen ser únicamente los varones los que se desplazan, de modo que los efectos en el ADN mitocondrial (heredado sólo por línea femenina) serán mínimos.

El caso mejor estudiado es la llegada de la agricultura a Europa, cuyo mapa refleja una distribución geográfica de frecuencias génicas a lo largo de un claro gradiente de sureste a noroeste. El trabajo estadístico del grupo de Robert R. Sokal, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, ha proporcionado una prueba valiosa de la hipótesis que asocia una parte significativa de este gradiente con la expansión de la agricultura desde Anatolia. Aunque esta correlación sustenta la tesis de que una población expansionista de campesinos llevó la agricultura a nuevos territorios, no prueba que los agricultores hablaran alguno de los dialectos indoeuropeos originales.

Hace poco, Guido Barbujani, de la Universidad de Padua, realizó un análisis similar para las otras familias lin-

güísticas cuya distribución puede explicarse por dispersión agrícola desde el Mediterráneo oriental (es el caso de la afro-asiática, la élamo-dravídica y la altaica antigua) y ha encontrado una correspondencia similar. Estudios más convincentes se han realizado en el Pacífico, donde la expansión de las lenguas polinesias muestra una correspondencia impresionante con las pruebas genéticas. En este caso, sin embargo, la correlación no debe sorprendernos: los polinesios fueron ocupando islas deshabitadas. Su movimiento se considera tanto una expansión agrícola como una dispersión inicial.

Una nueva prueba en apoyo de la irradiación africana procede del trabajo del equipo de Laurent Excoffier, de la Universidad de Ginebra; hallaron una estrecha correspondencia entre las variedades de gammaglobulina en muestras de sangre y la familia lingüística de los hablantes en cuestión. Lo que adquiere especial significación en las lenguas afro-asiáticas y corrobora la descripción aquí esbozada.

El defensor más tenaz de la correlación entre datos lingüísticos y genéticos ha sido Luigi Luca Cavalli-Sforza, de la Universidad de Stanford. En un ambicioso trabajo, ha comparado el árbol genealógico obtenido a partir de datos mundiales de genética molecular con un árbol genealógico establecido sólo a partir de datos lingüísticos. De su estudio se desprende un grado de solapamiento relativamente bueno.

No me he referido a parentescos lingüísticos que se remonten a más de 10.000 años. Este lapso temporal es incluso superior al que la mayoría de los lingüistas elegiría para trabajar, pero lo he justificado no tanto por medio de nuevas clasificaciones, cuanto proponiendo fechas desacostumbradamente tempranas para las familias lingüísticas bien establecidas. Conviene ahora avanzar algo más por la senda de los aglutinadores para observar la hipotética existencia de macrofamilias más incluyentes, como la amerindia y la indo-pacífica. Sus orígenes, suponiendo en cada caso una sola protolengua, se remontarían más de 20.000 años atrás.

Quizá la macrofamilia mejor conocida fue la elaborada por Vladislav M. Illich-Svitych y Aharon B. Dolgopolsky, de la Universidad de Haifa. Propusieron que el indoeuropeo, el afro-asiático, el dravídico, el altaico y el urálico se clasificaran juntos en una sola macrofamilia, la *nostrática* (del latín *nostras*, "nuestros compatriotas"); ésta, a su vez, deriva de una lengua proto-nostrática supuestamente hablada en el Oriente Medio hace unos 15.000 años. (Greenberg ha definido una macrofamilia parecida, "la euroasiática", que difiere de la nostrática por la exclusión del dravídico y el afroasiático y la inclusión del esquimo-aleutiano y el chucoto-camchatca.) Estas macrofamilias muestran también una buena correlación con las pruebas genéticas, como las presentadas por Cavalli-Sforza, y con algunas de las pruebas aportadas por la arqueología a las dispersiones agrícolas.



3. LAS PRUEBAS DIRECTAS de la existencia de lenguas antiguas no aparecen hasta hace unos 5000 años, con los primeros registros escritos, como esta inscripción pictográfica de Uruk.

Los aglutinadores lingüísticos no han calado todavía en la mayoría de sus colegas. Sin embargo, el método de análisis multilateral de Greenberg hace uso de tal batería de pruebas léxicas que impresiona ciertamente al no especialista. La escuela nostrática sí se propone usar el método comparativo de la reconstrucción histórica, cuya omisión le ha valido a Greenberg críticas severas. Los argumentos genéticos y arqueológicos, en efecto, armonizan bien con algunas conclusiones de los aglutinadores.

Algunos científicos, Ruhlen sobre todo, han sugerido incluso la existencia de afinidades mucho más esenciales entre las macrofamilias; por ejemplo, entre el amerindio y el euroasiático. Sostiene así que algunas formas de palabras modernas derivan manifiestamente de la protolengua única y última hablada por nuestros remotos antepasados africanos en su territorio de origen. Es difícil comprobar una afirmación de tal calibre y la mayoría de los lingüistas la rechazarán. En todo caso, los argumentos lingüísticos en favor de la monogénesis no contradicen las pruebas procedentes de la arqueología, la antropología y la genética molecular en apoyo de un origen africano para nuestra especie.

Entramos en aguas profundas. Parecen llevar, no obstante, una rastro del proceso histórico real. Lo confirma el trabajo de lingüística como Johanna Nichols, de la Universidad de California en Berkeley, quien analiza las lenguas según rasgos estructurales que podrían no encerrar significación genealógica. Su interesante análisis de tipología estructural en una muestra amplia de las lenguas del mundo le ha llevado a proponer tres estadios para sus orígenes que podrían armonizar con la secuencia que he sugerido.

Observa Nichols la existencia de dos clases de áreas lingüísticas. Las "zonas de diseminación", que son áreas amplias ocupadas por una o dos familias lingüísticas, de las que constituyen dos ejemplos Europa (con las lenguas indoeuropeas) y el norte de Africa (con las lenguas afro-asiáticas). Y las "zonas residuales", más pequeñas, aunque cada una alberga un número de familias lingüísticas establecidas hace tiempo: el Cáucaso y Nueva Guinea pertenecerían a esta categoría. Nichols explica las zonas de diseminación a través de los acontecimientos que siguieron al final de la última glaciación; las zonas residuales son, en general, reliquias de dispersiones iniciales anteriores.

Estamos asistiendo a la convergencia de pruebas arqueológicas, genéticas y lingüísticas (algunas). Comienza a divisarse las líneas maestras de una nueva gran síntesis, de la que cabe esperar que no sólo aclare la diversidad de las lenguas, sino también la de los genes y las culturas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ARCHAEOLOGY, GENETICS AND LINGUISTIC DIVERSITY. Colin Renfrew en *Man*, vol. 27, n.º 3, págs. 445-478; septiembre de 1992.

LINGUISTIC DIVERSITY IN SPACE AND TIME. Johanna Nichols. University of Chicago Press, 1992.

WORLD LANGUAGES AND HUMAN DISPERSALS: A MINIMALIST VIEW. Colin Renfrew en *Transition to Modernity: Essays on Power, Wealth and Belief.* Dirigido por J. A. Hall y I. C. Jarvie. Cambridge University Press, 1992.

Toxinas de cianobacterias

Estas toxinas contaminan estanques y remansos donde abrevan los animales y se infiltran en el agua potable del consumo humano. Pero también esconden un lado prometedor para el tratamiento del cáncer

Wayne W. Carmichael

El 2 de mayo de 1878 George Francis publicaba la primera descripción científica de los efectos potencialmente letales producidos por cianobacterias, mal llamadas algas azulverdosas por la espuma verde que cubre charcas y aguas estancadas. En carta a *Nature* exponía que el alga *Nodularia spumigena* (así consideró al microorganismo culpable) había proliferado tanto en el estuario del río Murray, que había formado "una densa capa espumosa, semejante a pintura verde, de unos cinco a quince centímetros de espesor y tan espesa y pastosa como unas gachas". Las aguas se habían tornado insalubres para el ganado y cuantos animales acudían a abrevar, arrastrándoles a una muerte rápida y terrible:

> Los síntomas consisten en estupor y pérdida de conocimiento, pérdida de equilibrio e inmovilidad, como si estuviesen dormidos, y, cuando se les toca, responden con convulsiones, manteniendo la cabeza y el cuello hacia atrás con un espasmo rígido, que cede antes de la muerte. El tiempo que tarda en producirse en el caso de las ovejas va de una a seis u ocho horas; para los caballos, de ocho a veinticuatro horas; para el perro, de cuatro a cinco horas; para el cerdo, de tres a cuatro horas.

Desde entonces se ha confirmado que la bacteria *Nodularia* y muchos otros géneros de cianobacterias comprenden cepas venenosas. Se sabe que han causado la muerte de animales salvajes y domésticos. Por millares se cuentan los patos, gansos y otras aves migratorias desplomados tras beber agua emponzoñada con cianobacterias tóxicas. Conocemos ya la estructura química de bastantes toxinas cianobacterianas y empiezan a acotarse las etapas que conducen a la sintomatología y a la muerte por esos venenos.

No se ha confirmado ninguna baja humana que pueda atribuirse a esas toxinas. Pero los vertidos de detergentes y fertilizantes están alterando la química de los cursos de abastecimiento y de zonas aptas para el baño, aumentando la concentración de nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes promueven la reproducción de cianobacterias y fomentan la formación de verdín. Conforme esos tapetes menudean en pantanos, ríos y estanques, aumenta la probabilidad de que las personas queden expuestas a dosis crecientes de toxinas. (El tratamiento de las aguas sólo consigue filtrar parcialmente las cianobacterias y diluir sus toxinas.) Crece también el riesgo de muerte para muchos animales.

La posibilidad de un incremento de la exposición reviste mayor peligro si se confirma que ciertas toxinas cianobacterianas contribuyen al desarrollo de tumores. El conocimiento de la estructura y de la actividad química de las toxinas facilitará el diseño de métodos para determinar el comportamiento de esos compuestos en el agua y desarrollar antídotos contra dosis letales. Desentrañando su mecanismo de acción, podremos investigar los efectos a largo plazo de la exposición a dosis no letales.

El estudio de la estructura y actividad de las toxinas importa también en otros campos. Estos productos y sus derivados empiezan a considerarse medicinas potenciales para el tratamiento de la enfermedad de Alzheimer y otras afecciones; además, están prestando servicios muy valiosos como herramientas de exploración de diversas cuestiones relacionadas con la biología celular.

Los manuales suelen referir que estas bacterias son fijadoras de nitrógeno. Las especies filamentosas (constituidas por células individuales unidas por sus extremos, a modo de cuentas de rosario) convierten el nitrógeno atmosférico en compuestos que vegetales y animales aprovechan en sus procesos vitales. Fertilizan los campos y de manera muy especial los arrozales.

Con frecuencia se asocian las cianobacterias a nuestra interpretación del origen de la vida y la formación de orgánulos en las células de organismos superiores. El registro fósil nos muestra que existían ya hace unos 3500 millones de años. Como eran los primeros organismos capaces de llevar a cabo fotosíntesis productoras de oxígeno, convirtiendo el anhídrido carbónico en oxígeno, han desempeñado una función decisiva en la oxigenación de la atmósfera. Esa liberación de oxígeno contribuyó probablemente a crear las condiciones propicias para la aparición de organismos aerobios. Con el tiempo, algunos organismos fotosintéticos quedaron atrapados para siempre en otros microbios: acabaron perdiendo su independencia para convertirse en cloroplastos, las estructuras responsables de la fotosíntesis en las plantas verdes.

Llegué a las cianobacterias atraído por las toxinas. A finales de los años sesenta, siendo alumno de botánica en la Universidad de Oregón, me fascinaban el microscopio y el mundo microscópico. Sentía también viva curiosidad por el modo de actuar de las toxinas —venenos de origen natural— y los mecanismos mediante los cuales dañan al organismo. En biología, las toxinas se reputan metabolitos secundarios, porque, aunque las sinteticen los organismos, no son estrictamente necesarias para su supervivencia diaria.

Decidí aunar ambos intereses estudiando la producción y acción de las toxinas cianobacterianas. En 1970 comencé el doctorado con Paul R. Gorham en la Universidad de Alberta en

WAYNE W. CARMICHAEL, profesor de biología y toxicología en la Universidad de Wright, es experto en cianobacterias y en métodos de detección de toxinas en el suministro de aguas.

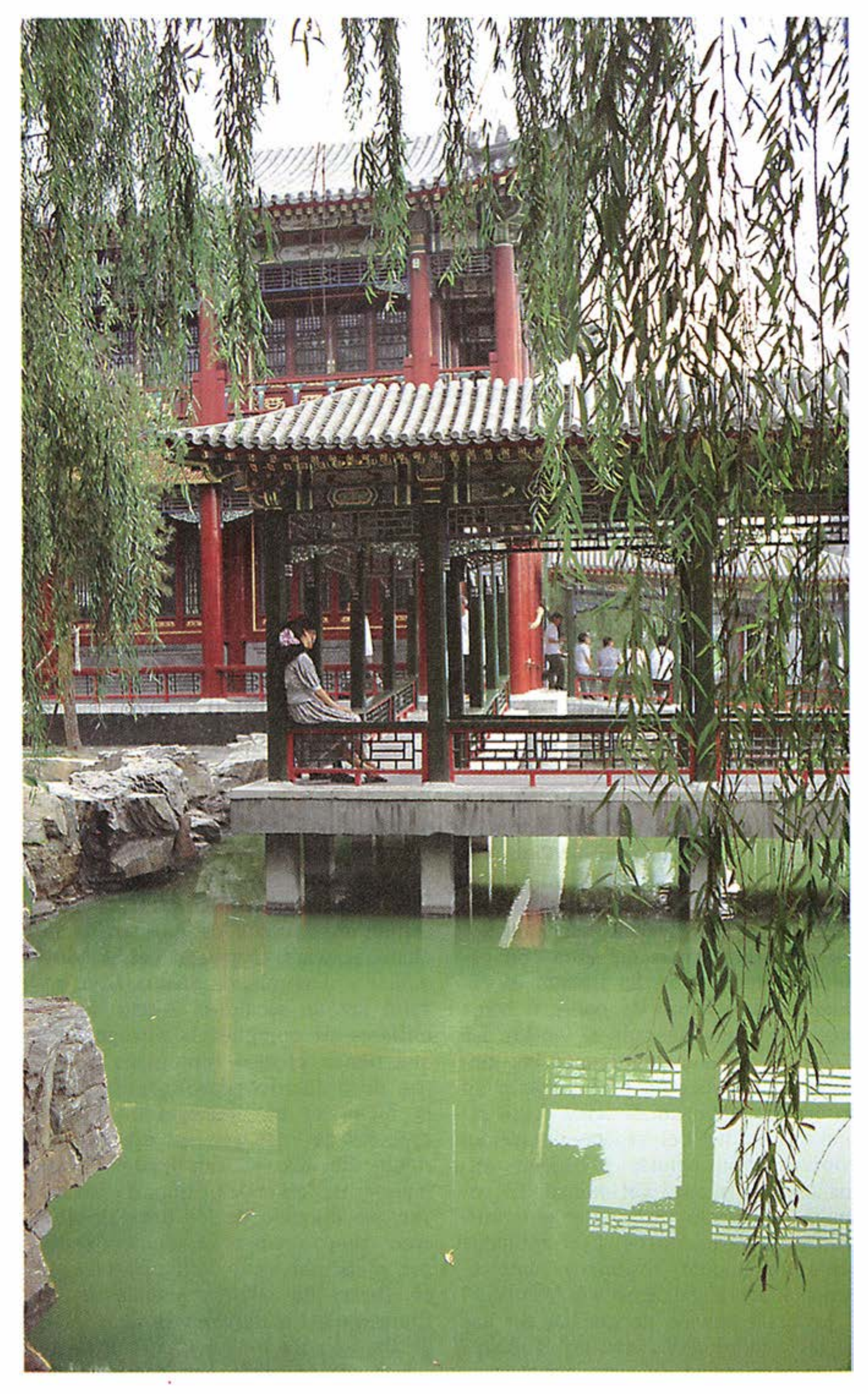
Edmonton. Gorham venía investigando, desde los años cincuenta, las propiedades de las cianobacterias tóxicas. En Africa del Sur, Australia y Estados Unidos se llevaban a cabo trabajos parecidos, pero el equipo de Gorham iba en cabeza de lo que yo deseaba saber.

Cuando me integré en su grupo, las cianobacterias se denominaban algas azulverdosas por el color turquesa de los acúmulos que originaban y por la semejanza entre microbios y algas (ambos realizan la fotosíntesis). Pero Roger Y. Stanier, de la Universidad de California en Berkeley, empezaba ya a sospechar la impropiedad de incluirlas entre las algas. El advenimiento de la microscopía electrónica en 1950, y gracias al trabajo de Stanier y de otros, dejó sentada la existencia de dos tipos de células radicalmente distintas. Las procariotas —que tienen características de bacterias— carecen de membrana envolvente del material nuclear y suelen estar privadas también en su interior de orgánulos encerrados por membranas. Todas las demás células, incluidas las de algas y plantas más complejas, son eucariotas: poseen una membrana nuclear precisa y mitocondrias, amén de otros orgánulos. Stanier señalaba en 1971 que "estos organismos no son algas; su asociación taxonómica con los eucariotas es un anacronismo... Las supuestas algas azulverdosas constituyen uno de los grupos principales de bacterias".

Los trabajo de Gorham, y posteriormente los míos, ampliaron las investigaciones iniciadas cuando las cianobacterias se consideraban todavía algas. Por los años cuarenta, un creciente número de informaciones asociaba a los microorganismos con intoxicaciones en animales. Estos morían después de beber en charcas cubiertas por una capa verdosa "de algas", en los días sofocantes de verano y principios de otoño, cuando la temperatura es elevada y no se mueve una hoja. Pero no se había establecido aún la relación causal entre géneros determinados de cianobacterias y la muerte de animales.

Theodore A. Olson, de la Universidad de Minnesota, vinculó ambos en el curso de unos estudios que realizó entre 1948 y 1950. Recogió muestras del "verdín del agua" en su finca y demostró que contenían cantidades abundantes de especies cianobacterianas de los géneros *Microcystis* y *Anabaena* (grupos comunes del plancton). Al hacer ingerir cianobacterias a los animales de laboratorio, comprobó que ciertas formas acuáticas resultaban venenosas.

Este hallazgo suscitó nuevas cuestiones. ¿Por qué se intoxicaban los animales fundamentalmente durante los días calurosos del verano y del otoño? La explicación parece ser que las cianobacterias crecen muy bien y forman el verdín cuando coinciden cuatro condiciones: viento suave o en calma, temperatura del agua entre 15 y 30 grados, *p*H neutro o básico (entre 6 y 9) y abundancia de nutrientes nitrogenados y fosforilados. En esas circunstancias las cianobacterias crecen mejor que las algas auténticas. (Las algas genuinas forman también verdín, pero en aguas ricas en nutrientes éste suele ser de cianobacterias tóxicas.)



1. ESTANQUE DE PEKIN contaminado con cianobacterias que se han multiplicado espectacularmente (*espuma verde*). Estas bacterias, que medran en el Jardín de las Maravillas, son miembros de un género muy difundido de *Microcystis*, del que muchas especies producen toxinas hepáticas muy potentes. Se sospecha que el consumo de dosis bajas de esas toxinas incluidas en el agua potable esté detrás de los numerosos casos de cáncer de hígado de ciertas zonas de China.



2. MASA DE CIANOBACTERIAS en las cercanías de Balgavies Loch, junto a la escocesa Dundee, con su típico aspecto de verdín. La capa se formó en 1981; estaba constituida por especies del género *Microcystis*.

El verdín cianobacteriano no provocaría probablemente ningún mal si los microbios que engloba estuvieran lejos de la orilla. Pero las cianobacterias se mueven en busca de la luz que necesitan para la fotosíntesis; por eso flotan en la superficie. Las corrientes de agua las empujan hacia zonas de remanso en la ribera, donde esas células cargadas de toxinas podrían acumularse. Los animales que beben tal masa concentrada consumen fácilmente dosis letales.

Debido a que las células liberan toxinas sólo cuando mueren o envejecen y se hacen permeables, los animales han de ingerir las células enteras para sufrir las consecuencias. Pero pueden también ingerir una dosis letal de toxinas en agua con células sueltas, si se ha tratado el estanque con sulfato de cobre u otros productos para destruir el verdín. La cantidad de agua teñida por las cianobacterias necesaria para matar a un animal depende de diversos factores: tipo y cantidad del veneno producido, concentración celular y especie, tamaño, sexo y edad del animal. El volumen requerido varía entre unos mililitros y varios litros. Los animales sedientos suelen abstenerse ante el hedor y sabor del agua emponzoñada.

La demostración de que las toxinas de las cianobacterias eran las causantes de la mortandad de aves migratorias puso sobre el tapete la cuestión de la naturaleza química y mecanismo de acción de las toxinas. Gorham recogió el reto en los años cincuenta. Hubo de empezar por desarrollar métodos para mantener los cultivos de cianobacterias tóxicas en el laboratorio. En los años cincuenta y sesenta, el equipo de Gorham consiguió cultivar dos de las cianobacterias más tóxicas, *Anabaena flos-aquae* y *Microcystis aeruginosa*. Con estos cultivos, aislaron las toxinas sintetizadas por las células e identificaron su composición química. La estructura química nos orienta sobre el mecanismo de acción de una molécula.

En 1972, Carol S. Huber y Oliver E. Edwards determinaron la primera estructura química de una toxina de cianobacterias. Derivada del *A. flos-aquae* y denominada anatoxina-a, resultó ser un alcaloide —uno de los millares de compuestos nitrogenados que tienen efectos biológicos potentes, de ordinario neurológicos. Hasta la fecha se ha conseguido cultivar especies de siete géneros cianobacterianos de los 12 implicados en la muerte de animales. Importa subrayar que ninguno de los doce géneros crece sobre rocas o vegetación; todos son planctónicos, y flotan en el agua en forma de células aisladas o en filamentos. La mayoría produce más de un tipo de toxina.

Las toxinas más estudiadas pertenecen a uno de dos grupos, definidos por el tipo de sintomatología que producen en los animales: neurotoxinas y hepatotoxinas. La anatoxina-a es un ejemplo de las primeras. Las neurotoxinas se oponen al funcionamiento normal del sistema nervioso y suelen provocar la muerte en minutos, tras paralizar los músculos respiratorios.

Otras toxinas cianobacterianas, como las producidas por la *N. spumigena* de Francis, son hepatotoxinas. Afectan al hígado y matan al animal por el estancamiento de la sangre en el hígado. Este estancamiento puede conducir a un fallo circulatorio fatal en cuestión de horas, o, al interponerse en la función normal del hígado, producir la muerte por fallo hepático a los pocos días.

Se han estudiado cuatro neurotoxinas. De éstas, la anatoxina-a y la anatoxina-a(s) parecen exclusivas de cianobacterias. Las otras dos —saxitoxina y neosaxitoxina— también se sintetizan en algas marinas. Yo tuve la suerte de explorar la actividad de la anatoxina-a poco después de que se descifrase su estructura. Este compuesto, fabricado por varias cepas de los géneros de agua dulce *Anabaena* y *Oscillatoria*, remeda al neurotransmisor acetilcolina.

Cuando las neuronas que inervan las células musculares liberan acetilcolina, ésta se enlaza en moléculas receptoras dotadas de un sitio de unión para el neurotransmisor y de un canal iónico que atraviesa la membrana celular. En el momento en que la acetilcolina se traba con los receptores, se abre el canal y se dispara el movimiento iónico que insta la contracción de las células musculares. Poco después, el canal se cierra, y los receptores quedan listos para responder a nuevas señales. Entre tanto, la acetilcolinesterasa regula el nivel de acetilcolina y evita una hiperestimulación de las células musculares.

La anatoxina-a es letal, porque no puede degradarse por la acción de la acetilcolinesterasa ni de ninguna otra enzima de células eucariotas. Permanece, pues, disponible para seguir estimulando el músculo; induce contracciones musculares y calambres, seguidos de fatiga y parálisis. Si interesa los músculos respiratorios, el animal sufrirá convulsiones (por falta de oxígeno en el cerebro) y morirá por asfixia. No existe ningún antídoto contra la anatoxina-a; por eso, importa descubrir las fases iniciales de la formación del verdín para prevenir las muertes de animales ofreciéndoles abrevaderos alternativos.

Para los animales, la anatoxina-a

constituye un peligro grave; para los científicos, un regalo de la naturaleza. En cuanto remedo de la acetilcolina, la anatoxina-a se ha convertido en excelente herramienta de investigación. Así, al resistir la degradación por la acetilcolinesterasa, la toxina y sus derivados pueden sustituir a la acetilcolina en experimentos sobre el mecanismo de unión entre acetilcolina y sus receptores y en ensayos sobre la forma en que dicho neurotransmisor condiciona la actividad de éstos (especialmente la de los receptores nicotínicos de acetilcolina en el sistema nervioso periférico y central).

Edson X. Alburquerque y su equipo, de la Universidad de Maryland, están estudiando la posibilidad de que una versión modificada de la anatoxina-a sirva para frenar la degeneración mental de la enfermedad de Alzheimer. En muchos pacientes, el deterioro se debe, en parte, a la destrucción de neuronas que sintetizan acetilcolina. Ahora bien, no puede administrarse acetilcolina para reemplazar al neurotransmisor perdido, puesto que desaparece demasiado pronto. Pero sí podría sustituirle una versión de la anatoxina-a, modificada para reducir su toxicidad. Los derivados de anatoxina-a podrían resultar aprovechables en otras afecciones donde existe un déficit de acetilcolina o su acción esté dificultada, como ocurre en la miastenia gravis (una enfermedad degenerativa que produce debilidad muscular).

Cepas de *Anabaena* sintetizan la otra neurotoxina exclusiva de las cianobacterias, la anatoxina-a(s). Produce bastantes síntomas de la anatoxina-a, y de ahí su denominación. La letra "s" se añadió porque la anatoxina-a(s) parecía ser una variante de la anatoxina-a que provocaba una salivación excesiva en los vertebrados. Pero en un trabajo reciente he demostrado, con Shigeki Matsunaga y Richard E. Moore, de Hawai, que la anatoxina-a(s) difiere químicamente de la anatoxina-a y provoca la sintomatología por otro camino.

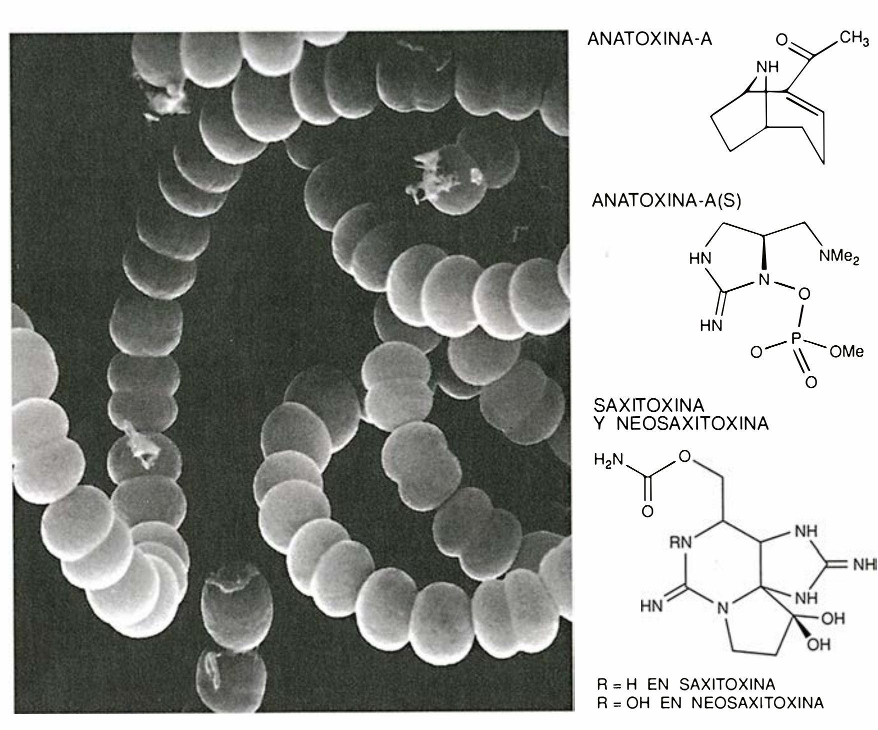
La anatoxina-a(s) es un fosfato orgánico natural, cuyo mecanismo de acción recuerda el de los insecticidas organofosforilados sintéticos, como el parathion y el malathion. Según mis datos, se trataría del único insecticida organofosforilado natural descubierto hasta la fecha. Aunque su estructura difiera de la de los compuestos sintéticos, su poder mortífero se debe, como el de éstos, a su capacidad de inhibir la acetilcolinesterasa. Al impedir que la enzima degrade la acetilcolina, asegura que este neurotransmisor siga estando disponible de una manera continua para estimular —e hiperestimular— las células musculares.

La anatoxina-a(s) podría constituir, en principio, un buen punto de partida para conseguir plaguicidas organofosforilados de nuevo cuño. Los compuestos organofosforilados sintéticos, más tóxicos para los insectos que para el hombre, presentan inconvenientes; al ser liposolubles, tienden a acumularse en las membranas celulares y partes ricas en lípidos del hombre y otros vertebrados. La anatoxina-a(s), por el contrario, es más soluble en agua, y por ello más biodegradable; podría resultar, en consecuencia, más inocua. Podría también tener más dificultad para atravesar las cutículas ricas en lípidos, o los exoesqueletos, de los insectos. Manipulando la estructura de la anatoxina-a(s), podría diseñarse un compuesto que originara una acumulación mínima en los tejidos de los vertebrados sin mermar su eficacia plaguicida.

Lo mismo que la anatoxina-a y la anatoxina-a(s), las neurotoxinas saxitoxina y neosaxitoxina interrumpen la comunicación entre neuronas y células musculares. Sin embargo, en este caso lo hacen impidiendo la liberación de la acetilcolina por parte de las neuronas. Para que las neuronas segreguen acetilcolina u otros neurotransmisores, deben generar en primer lugar un impulso eléctrico. Impulso que tiene que propagarse a lo largo de un axón; esta actividad se halla vinculada al flujo de iones de sodio y potasio a través de los canales de la membrana del axón. Cuando el impulso alcanza un axón terminal, éste libera la acetilcolina almacenada. La saxitoxina y la neosaxitoxina bloquean el flujo de iones de sodio hacia el interior a través de los canales de la membrana; consiguientemente hacen inviable cualquier impulso y detienen la secreción de acetilcolina.

Aunque la saxitoxina y la neosaxitoxina se sinteticen en cepas de *Anabaena* y *Aphanizomenon*, estas toxinas se conocen mejor como productos de dinoflagelados: las algas marinas causantes de las "mareas rojas", culpables de las intoxicaciones paralizantes por consumo de ostras afectadas.

El descubrimiento de la saxitoxina y de la neosaxitoxina en las cianobacterias no revolucionó el diseño de fármacos o insecticidas, ni abrió nuevos caminos a la biología celular. Pero planteó una cuestión fascinante. ¿Por qué las cianobacterias de agua dulce producen los mismos compuestos que sintetizan los eucariotas marinos? ¿Acaso estos grupos tan dis-

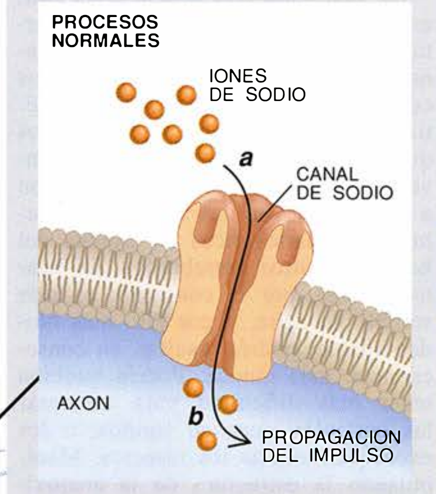


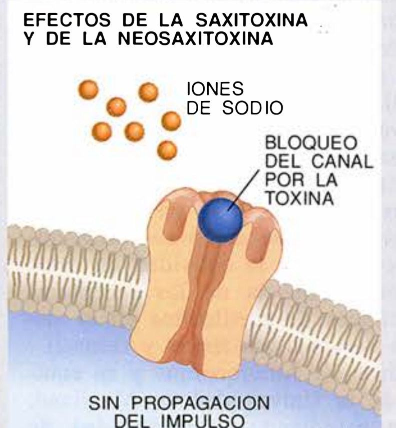
3. LAS PERLAS DE ESTE COLLAR (*micrografía*) son células de la cianobacteria *Anabaena flos-aquae*, observadas a 2500 aumentos. *A. flos-aquae* es uno de los principales productores de neurotoxinas, agentes tóxicos que se interponen en el funcionamiento normal del sistema nervioso. La cepa que se muestra causó la muerte de cerdos en Griggsville, Illinois. Las estructuras químicas de la derecha representan toxinas sintetizadas por cepas de *Anabaena*; todas, a excepción de la anatoxina-a(s), se encuentran también en otras cianobacterias.



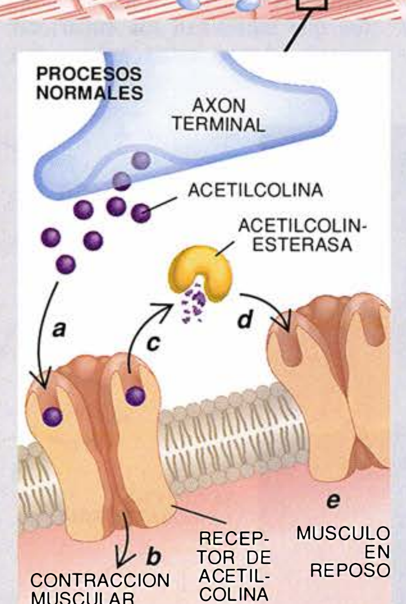
Así matan las neurotoxinas

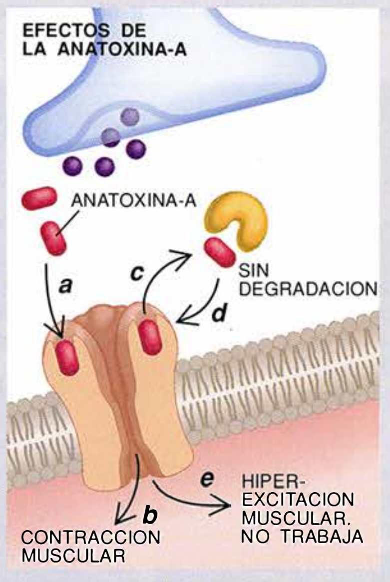
Las neurotoxinas producidas por las cianobacterias alteran el sistema normal de señalización entre neuronas y músculos. Provocan la muerte al paralizar los músculos respiratorios con la consiguiente asfixia.

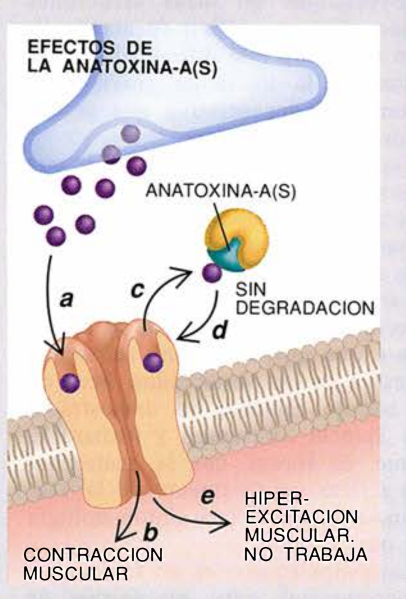




La saxitoxina y la neosaxitoxina silencian a las neuronas que actúan sobre las células musculares. Los iones de sodio (*dorado*) deben fluir hacia las neuronas (*a, a la izquierda*) para que éstas retransmitan los impulsos (*b*) a otras células. La saxitoxina y la neosaxitoxina (*esfera azul*) suspenden la propagación del impulso hacia las neuronas; las células musculares quedan paralizadas.



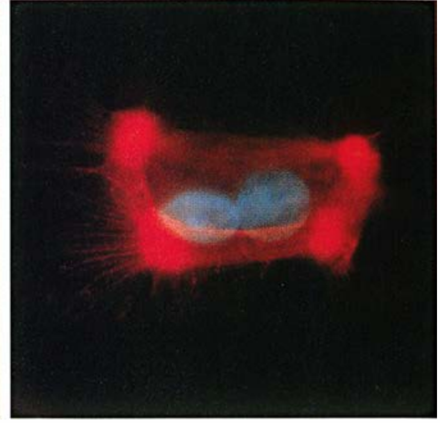




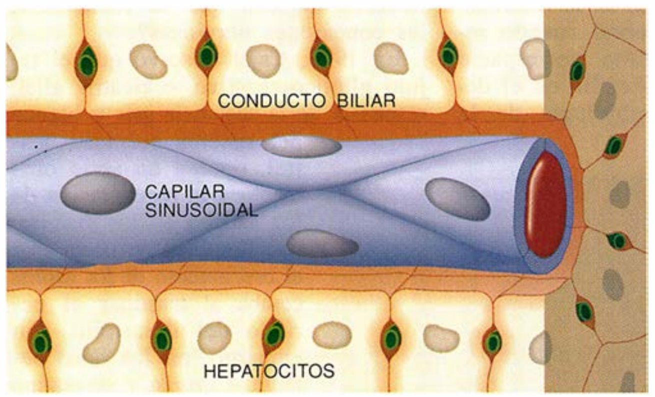
La anatoxina-a y la anatoxina-a(s) (*centro y derecha*) hiperexcitan las células musculares al alterar el funcionamiento de la acetilcolina. Las moléculas del neurotransmisor (*púrpura*) se unen a los receptores de acetilcolina de las células musculares (*a, izquierda*), provocando la contracción de éstas (*b*). La acetilcolinesterasa (*amarillo*) degrada la acetilcolina (*c*) permitiendo que sus receptores y, por tanto, las células musculares vuelvan a su estado de reposo (*d* y *e*). La anatoxina-a (*rojo, centro*) imita a la acetilcolina. También se une a los receptores de acetilcolina (*a*), disparando la contracción (*b*), pero no puede degradarse por la acetilcolinesterasa (*c*). Y prosigue actuando sobre las células musculares (*d*). Las células quedan tan exhaustas, debido a la contracción continuada, que dejan de funcionar (*e*). La anatoxina-a(s) (*verde en el panel de la derecha*) actúa de una manera más indirecta. Permite que la acetilcolina se una a su receptor e induce la contracción (*a* y *b*), pero impide que la acetilcolinesterasa degrade la acetilcolina (*c*). Como resultado, la acción del neurotransmisor persiste e hiperestimula los músculos respiratorios (*d*), que una vez más llegan a quedar tan fatigados que dejan de funcionar (*e*).

5. MICROFILAMENTOS (*hilos rojos en las micrografías*). **Estos componentes estructurales de las células suelen ser bastante largos, como en el hepatocito de rata de la izquierda. Después de la exposición a las microcistinas (*derecha*), los microfilamentos se retraen hacia el núcleo (*azul*). (Esta célula, igual que muchos hepatocitos sanos, contiene dos núcleos.) La retracción insta el encogimiento de los hepatocitos, células que de suyo forman contacto entre sí y con los capilares sinusoidales (*abajo, izquierda*). Las células contraídas se separan unas de otras y de los sinusoides (*abajo, derecha*). Las células de los sinusoides se separan también, provocando una infiltración sanguínea en el tejido hepático.**

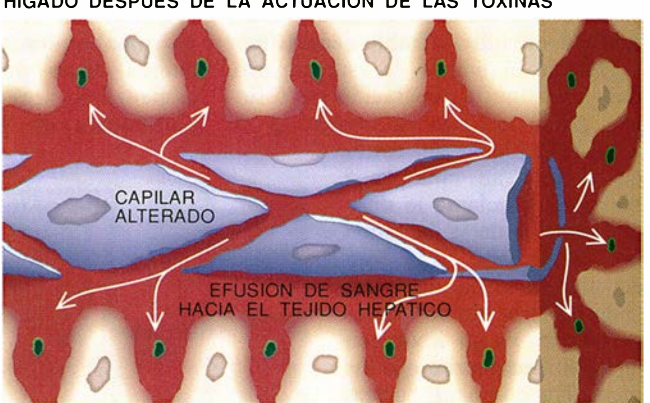




HIGADO SANO



HIGADO DESPUES DE LA ACTUACION DE LAS TOXINAS



esta cuerda floja acuática pagan un precio, el de una descendencia menor, para así sobrevivir y reproducirse.

Es posible, sin embargo, que el efecto protector sea incidental. Las toxinas podrían haber tenido en el pasado alguna función crítica que se haya perdido. Abona esta posibilidad el hecho de que las microcistinas y nodularinas actúen sobre las proteína fosfatasas que regulan la proliferación de células eucariotas. Las hepatotoxinas no parecen participar en la función celular y en la división celular de las cianobacterias, pero pudieron cumplir esa misión en épocas tempranas de la evolución de estos organismos (y de otros microorganismos).

Cualquiera que sea su propósito, la toxicidad de muchas de las sustancias producidas por las cianobacterias es innegable. De ahí lo inquietante de cierta moda: la de incluir cianobacterias del género *Spirulina* en una dieta sana. Algunas tribus del Chad y muchos pueblos de México han consumido durante cientos de años dos especies de *Spirulina* cercanamente emparentadas. Cuando los expertos de organismos mundiales sobre la salud comenzaron a buscar fuentes con alto contenido proteico, a mediados de los años sesenta, muchos fijaron su atención en la *Spirulina* por su alto contenido proteico. Desde las postrimerías de los años setenta algunos productores y distribuidores de *Spirulina* comenzaron su promoción en los Estados Unidos, Canadá y Europa como alimento nutritivo para el hombre. También se ha comercializado en píldoras, basándose en informes no confirmados, según los cuales unos cuantos gramos tomados antes de las comidas disminuyen el apetito.

La *Spirulina* no es nociva por sí misma. El peligro se origina al no existir una normativa que exija de quienes ponen en el mercado la *Spirulina* que controlen sus productos para excluir la contaminación de cianobacterias potencialmente tóxicas o por toxinas cianobacterianas. Además, la gente no está preparada para distinguir la *Spirulina* y otros productos cianobacterianos benignos de las formas venenosas.

Mis temores se han agravado con la comercialización de *Anabena* y *Aphanizomenon*, géneros que contienen cepas sumamente tóxicas. En algunos anuncios se llega incluso a afirmar que los artículos que se ofrecen pueden aliviar determinados síntomas de enfermedad, incluidos los trastornos neuromusculares debilitantes. Pero no se detallan las especies microbianas que contienen los productos destinados a la venta, ni se señala ningún tipo de control que asegure que son puros y carecen de toxicidad. Como las cianobacterias se recogen a menudo de los estanques, y como ni vendedores ni compradores están capacitados para distinguir las cepas tóxicas de las inocuas, la seguridad de estos artículos se hace muy cuestionable.

Las cianobacterias constituyen un pequeño grupo taxonómico de unas 500 a 1500 especies. Pero es grande su poder de dañar o favorecer a los animales y al hombre. Estudiadas y explotadas responsablemente, se convierten en valiosas herramientas para la investigación básica. Y tal vez algún día podamos beneficiarnos de ellas para el tratamiento de enfermedades.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A STATUS REPORT ON PLANKTONIC CYANOBACTERIA (BLUE-GREEN ALGAE) AND THEIR TOXINS. W. W. Carmichael. U.S. Environmental Protection Agency, Informe EPA/600R-92/079, junio de 1992.

A REVIEW OF HARMFUL ALGAL BLOOMS AND THEIR APPARENT GLOBAL INCREASE. Gustav M. Hallegraeff en *Phycologia*, volumen 32, número 2, páginas 79-99; marzo de 1993.

DISEASES RELATED TO FRESHWATER BLUE-GREEN ALGAL TOXINS, AND CONTROL MEASURES, W. W. Carmichael y I. R. Falconer en *Algal Toxins in Seafood and Drinking Water*. Dirigido por I. R Falconer. Academic Press, 1993.

pueda estar vinculada a las toxinas cianobacterianas presentes en el agua.

Algunos datos sugieren también que la exposición a niveles subletales de hepatotoxinas cianobacterianas ha provocado alteraciones temporales de las funciones del estómago, intestino e hígado en determinadas poblaciones. En algunos casos en los que fueron muchas las personas afectadas simultáneamente, los datos apuntan hacia las cianobacterias tóxicas en el agua potable como agente causal. Parece, pues, razonable que la exposición repetida a niveles bajos de toxinas fomente el desarrollo de alteraciones crónicas del tracto gastrointestinal y del hígado. Si el cáncer y otras enfermedades crónicas constituyen un peligro real, deberá someterse a un control estricto el suministro del agua potable.

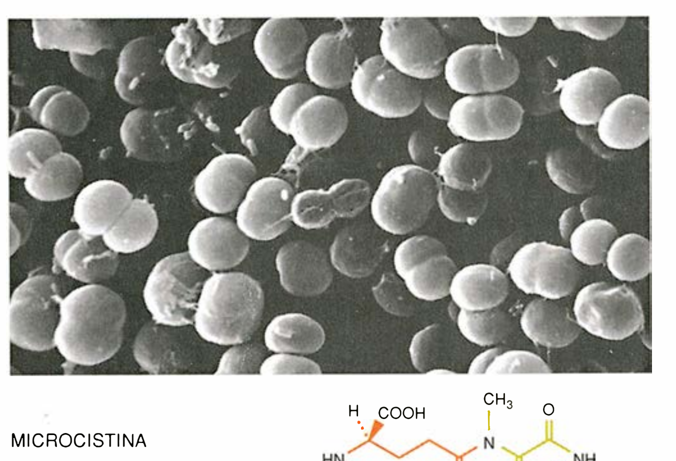
Como ocurre con las neurotoxinas, no todo es negativo en las hepatotoxinas. Puesto que alteran el citoesqueleto, se las ha aprovechado para estudiar el funcionamiento de este andamiaje celular. Con esta misma idea se vienen utilizando algunos venenos de setas. Y como las microcistinas bloquean la acción de las proteína fosfatasas, se recurre a su comportamiento para desentrañar el mecanismo de acción de esas enzimas; en este sentido, y dado que ciertas microcistinas se unen fuertemente a las proteína fosfatasas 1 y 2A, sirven de sondas para aislar tales enzimas fosfatasas a partir de preparaciones de tejidos. Determinando después las secuencias aminoacídicas de las enzimas, podremos deducir las secuencias de nucleótidos de los correspondientes genes, y, luego, aislar los genes para conocer su regulación.

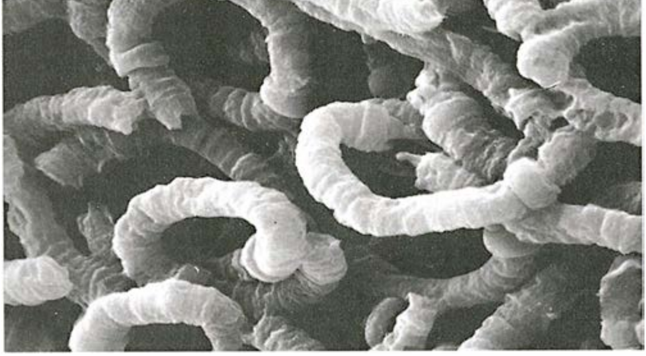
Neurotoxinas y hepatotoxinas son ciertamente los compuestos más peligrosos de las cianobacterias. Pero no se limitan a ellas las sustancias bioactivas que sintetizan. Los microorganismos producen, también, citotoxinas: sustancias que lesionan las células aunque no lleguen a matar a organismos pluricelulares. El trabajo de Moore y Gregory M. L. Patterson revela cuán prometedoras se muestran varias citotoxinas para destruir algas y bacterias. Algunas podrían ser útiles incluso para atacar células tumorales y el virus de la inmunodeficiencia humana causante del sida.

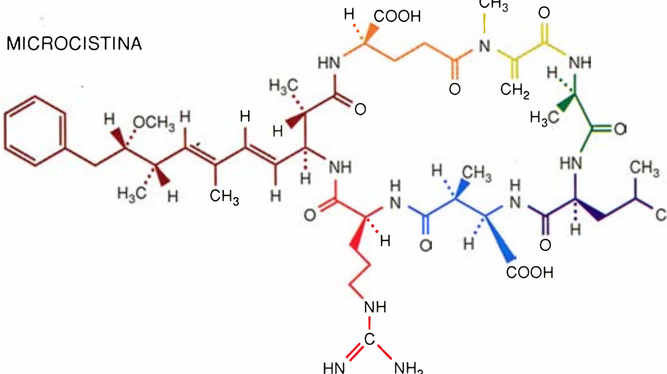
¿Qué sentido tiene la síntesis de todas estas sustancias? Pueden reforzar el sistema defensivo de las cianobacterias frente al ataque de otros organismos. Pero, ¿por qué han de producir las cianobacterias sustancias letales para el ganado y otros animales? Después de todo, nunca ha sido el ganado su depredador fundamental.

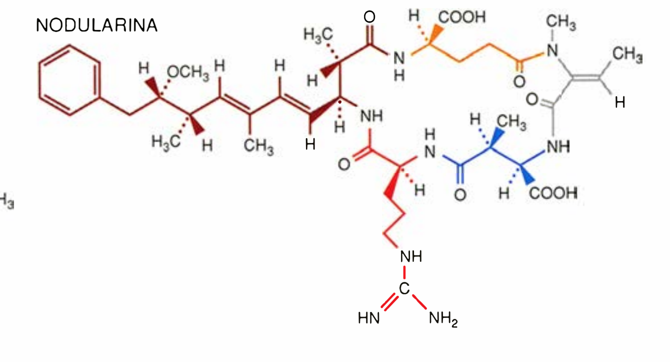
Una línea de investigación reciente de mi laboratorio, acometida en colaboración con William R. DeMott, de la Universidad de Indiana, está aportando algunas pistas. Resulta que las neurotoxinas y hepatotoxinas de las cianobacterias pueden ser extremadamente nocivas no sólo para aves, vacas, caballos, etc., sino también para animales diminutos (zooplancton) que viven en lagos y charcas. Las toxinas pueden ser directamente letales (sobre todo, las neurotoxinas), o pueden reducir el número y tamaño de la descendencia de estos organismos que se alimentan de cianobacterias. En otras palabras, de igual modo que las plantas vasculares sintetizan taninos, fenoles, esteroles y alcaloides para defenderse contra la depredación, cabe que las cianobacterias sinteticen venenos para protegerse de las especies de plancton que conviven con ellas.

En apoyo de esta hipótesis, hemos visto que las especies de zooplancton no suelen consumir cianobacterias productoras de toxinas, a menos que no encuentren otro alimento alrededor; entonces, intentan modular la cantidad de ingesta para evitar una dosis letal. Quienes se balancean sobre









4. CIANOBACTERIAS que sintetizan toxinas destructoras de hepatocitos. Destacan entre ellas *Microcystis aeruginosa* (*micrografía de la izquierda*) y *Nodularia spumigena* (*micrografía de la derecha*), vistas a 2500 y 1250 aumentos, respectivamente. Estos agentes tóxicos, incluidas las dos variedades cuyas estructuras se ilustran, son péptidos, constituidos por siete aminoácidos (marcados con distintos colores), que se conocen con el nombre de microcistinas (por haberse descubierto en una cepa de *Microcystis*); los que están constituidos por cinco aminoácidos reciben el nombre de nodularinas.

se requerían para desatar una actividad que más tarde, con nuevos métodos de inmunoensayo, permitió esbozar, al menos, una imagen aproximada.

Hasta ese momento, la supervivencia de trasplantes en el sistema nervioso, así como su integración con el tejido del huésped, eran una aspiración bastante más lejana. Quienes se ocupan de descifrar el sistema nervioso central de los mamíferos juegan con desventaja frente a una genuina "caja negra". Sin embargo, al descifrarse la presencia de factores tróficos en respuesta a las lesiones, así como el curso temporal de su aparición, se ganó una significativa ventaja para lograr la supervivencia de trasplantes "Ese proceso pasa por el intercambio de proyecciones entre el tejido trasplantado y el huésped. Es por tanto esencial trasplantar el tejido unos ocho a diez días después de la lesión, cuando la actividad de los factores neurotróficos y neuritogénicos es máxima."

En cierta forma, las lesiones en el sistema nervioso provocan un efecto parecido al rejuvenecimiento del que forman parte las células de la glía. "Se sabía que en el sistema nervioso central los brotes axonales encontraban un medio mucho menos favorable a la extensión axonal. Pero se desconocían los procesos bioquímicos y la participación de cada una de las células del medio donde viven las neuronas", explica Nieto, quien cuestiona el protagonismo absoluto de la neurona en el funcionamiento del tejido nervioso.

"La neurona es como un *idiot savant*. Alguien que sabe hacer algo muy bien, pero que necesita de otros que le digan cómo hacerlo, o que le permitan hacerlo." Las células de la glía (oligodendroglía, astrocitos y microglía), además de facilitar la nutrición y brindar soporte a las neuronas, participan en el establecimiento de ese ambiente adverso que contrarresta la regeneración axonal.

"Vi que era importante saber cómo se regulaba la división de la glía, células que no se dividen aunque conservan la capacidad de hacerlo. En los mamíferos, el número de células de astroglía permanece constante en el adulto, y la división es un evento más posible que real. Los astrocitos reactivos, y las células de microglía activadas, principales componentes celulares del tejido de lesión o cicatriz, poseen características diferentes de las del tejido glial adulto en reposo. Sospechaba que los inhibidores de la mitosis podían ser fundamentales en el control de las poblaciones de glía del sistema nervioso central. Pero faltaba la demostración."

Nieto identificó la presencia de sustancias antimitóticas naturales en el cerebro de los mamíferos. "Todo el mundo iba detrás de los factores tróficos, por eso me puse a buscar todo lo contrario", comenta. *Science* publicó en 1988 sus resultados, que revelaron la presencia de un factor inhibidor de la mitosis de los astrocitos, inmunológicamente relacionado con el receptor del factor de crecimiento epidérmico, que es una hormona polipeptídica con diversas actividades, entre ellas la de estimular la división de los astrocitos.

Combinó el análisis bioquímico con el estudio del efecto de una lesión en el cerebro del animal. "Una lesión cerebral causa una reducción de los niveles de este inhibidor, que guarda relación con el tiempo transcurrido desde el momento de la lesión. Al mismo tiempo se detecta la aparición del receptor del factor de crecimiento epidérmico en la superficie de los astrocitos."

"La neurona es como un idiot savant. *Alguien que sabe hacer algo muy bien, pero que necesita de otros que le digan cómo hacerlo."*

A partir de los años ochenta se produjo una explosión de información sobre los factores neurotróficos y sus receptores, pero los expertos no se han puesto de acuerdo sobre el origen de estas moléculas. Por un lado va la escuela de las neurotrofinas, que defiende que las neuronas diana son la fuente preponderante de los factores neurotróficos. Por otro, cada vez hay más pruebas que respaldan la participación e importancia de la glía como fuente primaria de factores tróficos.

Nieto propone una visión funcional de los elementos del tejido nervioso. "Los protagonistas de la plasticidad neural son los conjuntos dinámicos glía-neurona. Parece claro que la glía regula el crecimiento y la supervivencia de las neuronas, incluidos el crecimiento axonal y la remodelación sináptica tanto en condiciones normales como tras una lesión o enfermedades neurodegenerativas."

Partidario de resaltar la influencia del entorno donde residen las células neurales, esta línea de pensamiento le ha conducido a desarrollar un modelo basado en el uso de trasplantes de un tipo especial de glía. En los noventa, el equipo de plasticidad del Instituto Cajal ha diseñado un modelo experimental que aprovecha una parte del sistema nervioso central de los mamíferos, que mantiene su capacidad de regeneración. "Durante toda la vida se generan nuevas neuronas olfatorias y, en contraste con los brotes regenerativos en otras regiones del sistema nervioso central, los axones olfatorios son capaces de navegar sin problemas en el tejido adulto, en su curso hacia sus dianas sinápticas."

Su hipótesis es que este viaje se completa gracias a la compañía de unas modestas células, glía envolvente, presentes sólo en el sistema olfatorio. La búsqueda de nuevas rutas en el conocimiento de la regeneración ha llevado a que, durante los tres últimos años, el grupo que dirige Nieto haya cultivado y caracterizado inmunológicamente la glía envolvente de rata adulta. Lo más prometedor de esta aproximación a un problema tan antiguo es que, una vez que se consiguió aislar y purificar la glía envolvente, se pudo confirmar su acción sobre axones sensoriales seccionados.

"Realizamos el trasplante de estas células puras tras una rizotomía, en la que se cortan las raíces dorsales de la médula. Se logró así comprobar el crecimiento regenerativo. Los axones sensoriales se inician, entran en la médula espinal, crecen a través del tejido adulto, tanto gliótico como normal, y alcanzan la mayoría de sus blancos."

Ha subido de una zancada sobre un estante para localizar esa publicación que se niega a aparecer. Desde allí comenta en qué no se parecen un ordenador y un cerebro. "Un ordenador es como un mal cerebro. Rígido y mal hecho. Cuando se asimila el cerebro al ordenador, lo único que se demuestra es no tener ni remota idea de cómo es un cerebro. De cómo opera, cuál es su estructura anatómica, y cuáles son sus programas de funcionamiento. Los ordenadores tienen que mejorar mucho antes que se pueda afirmar que un cerebro se parece a un ordenador", resume con una sonrisa burlona en medio de una barba razonablemente descuidada. Si en ese momento entrara al despacho alguien que no conoce al titular del laboratorio de plasticidad neural, podría confundirlo con un estudiante irreverente en plena faena festiva. Que es tal vez el mejor talante para cultivar un campo de trabajo donde, más que certezas y triunfos, florecen interrogantes sin respuesta.

Alina Quevedo

MANUEL NIETO SAMPEDRO: *la regeneración de lo indivisible*

La puerta del despacho de Manuel Nieto Sampedro en el madrileño Instituto Cajal del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) está acribillada con dibujos. Es fácil reconocer una sinapsis trazada con rotulador azul, junto a un indescifrable jeroglífico.

Delatan el humor de este experto, que investiga la reparación de lesiones producidas en el cerebro y la médula espinal, un cartel en el que un chimpancé sonriente proclama lo duro que resulta dejar la cama por la mañana y la foto de una bandada de aves, "águilas pescadoras", aclara, posadas en un árbol, con un rótulo manuscrito que las identifica como el "grupo de plasticidad neural".

Nieto llegó a la neurobiología después de una fructífera incursión en el esclarecimiento de los mecanismos moleculares de acción de la penicilina y la vancomicina. Una labor desarrollada junto a Harold R. Perkins, en el londinense Instituto Mill Hill de Investigaciones Médicas, terminada la licenciatura en química en la Universidad Central, en 1967. "Esa fue una buena etapa en la que, como ahora, concertaba el análisis de fenómenos *in vitro* con la búsqueda de lo que sucede en el bicho de verdad", afirma.

Regresa a España en 1972 y entra en el Centro de Investigaciones Biológicas. "Hice posibilismo", comenta. "Había vuelto porque creía que tenía algo que aportar. Pero pronto me di cuenta de que no era así. Poco a poco me quedé con un laboratorio encogido hasta la mínima expresión, unos diez metros cuadrados. Me sentí echado." Usa una ironía inteligente con la que endulza los agravios. Así que no dudó en solicitar algo de espacio en las instalaciones del Instituto Cajal. "Había salones completamente vacíos. Supongo que los aprovechaban para echar carreritas." Falto de apoyo y recursos, sólo se le ofrecía sumarse a la tendencia paralizadora que imperaba.

Pero nada más ajeno a este explorador. A sus 49 años, se le iluminan los ojos azules y sonríe cuando recuerda cómo por falta de espacio comenzó su segundo exilio en el departamento de psicobiología de la Universidad de California en Irvine. En California encontró el ambiente que necesitaba. Allí, el equipo dirigido por C. W. Cotman trabajaba en la respuesta del tejido nervioso a una lesión. El problema había acaparado ya la atención de nuestro Santiago Ramón y Cajal, quien sentó las bases anatómicas del que sigue siendo uno de los más obscuros campos de la neurobiología. ¿Por qué, en el sistema nervioso central y después de una lesión, no crecen los axones? ¿Qué factores impiden que se restablezcan las conexiones nerviosas?

En 1928, Cajal observó que el tejido gliótico reactivo, o cicatriz glial, respuesta de la sustancia gris y blanca del sistema nervioso central, oponía un serio obstáculo a la regeneración de los axones en los mamíferos. También se creía que el crecimiento de los axones cesaba al terminar el período del desarrollo. Sin embargo, en los años setenta, Cotman y su equipo demostraron que las neuronas del sistema nervioso central mantenían la capacidad de reorganizar sus axones, así como sus prolongaciones dendríticas. Pero, ¿por qué no se producía la recuperación espontánea después de una lesión?

Manuel Nieto realizó un experimento decisivo en los años ochenta que permitió idear estrategias para combatir la muerte de las neuronas, acelerar los procesos de crecimiento axonal y controlar la proliferación de la glía

Este fenómeno llevó a comparar los eventos que tienen lugar en el sistema nervioso central con los observados en el sistema nervioso periférico, donde sí se produce regeneración. En ambos casos, después de una lesión, se desencadena la proliferación de las células gliales, se produce deposición de componentes de la matriz extracelular e invasión de macrófagos y aumenta la concentración de factores neurotróficos.

La bioquímica de estos procesos constituía uno de los territorios menos explorados del sistema nervioso central. En 1982, *Science* daba cuenta de un trabajo que Nieto diseñó y realizó sobre la descripción de factores de crecimiento, tróficos y neuritogénicos, que el sistema nervioso central produce en respuesta a las lesiones. Sus resultados brindaban algunas de las pistas que

Mientras se realiza la operación de muestreo y recogida, conviene atender a la distribución espacial de los carbones en el yacimiento, para conocer la procedencia de los mismos. Suelen aparecer concentrados en estructuras de combustión (culinarias o para calentarse) o bien diseminados por el sedimento del nivel de ocupación. Según L. Chabal, estos últimos reflejan el muestreo más completo de la vegetación porque son el producto de las recogidas diarias de leña efectuadas, así como el resultado de los numerosos vaciados de hogares realizados en un lapso de tiempo no determinado. Los concentrados en hogares representan los últimos restos de combustión, suelen ser pobres en especies y suministran menos información que los carbones dispersos. Por consiguiente, la distinción entre concentrados y dispersos es tarea obligada durante la fase de recogida. Nosotros nos hemos atenido a este supuesto, seguido por numerosos trabajos antracológicos recientes, tan sólo en la fase de muestreo.

En los yacimientos cantábricos, los carbones aparecen diseminados por todo el nivel de ocupación, sin configurar ninguna estructura de combustión clara. De ahí que nos hayamos visto obligados a prescindir del mencionado supuesto durante la interpretación de los resultados. Entendemos que interviene siempre la selección por parte del hombre, ya se trate de carbones dispersos o de carbones concentrados dentro de un mismo yacimiento. La diversidad específica que se refleje en cada espectro antracológico dependerá de diferentes factores: económicos (recursos disponibles y buscados, función de cada yacimiento y estacionalidad) y topográficos (diversidad de biotopos). A pesar de esta selección, la interpretación paleoecológica es posible de acuerdo con la naturaleza de cada especie hallada.

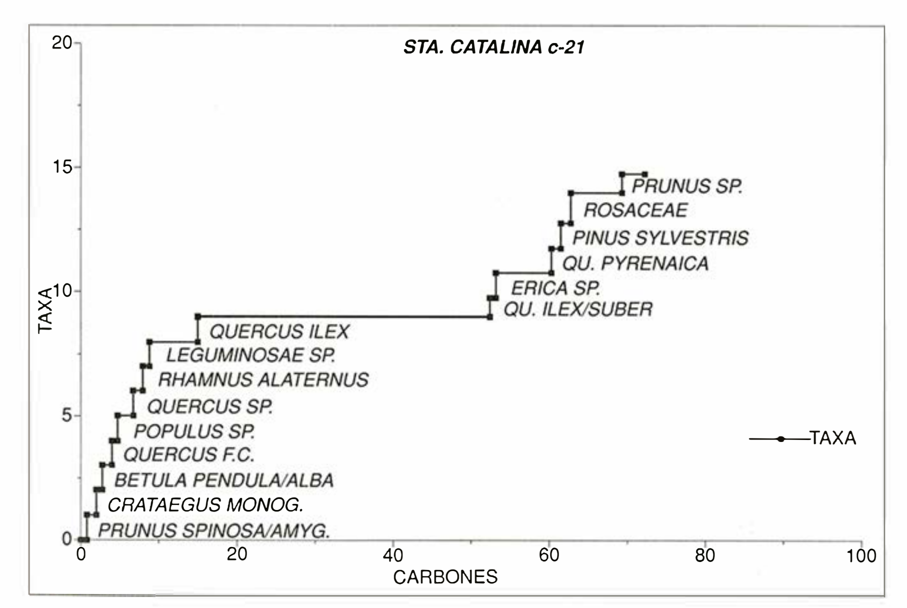
El análisis de laboratorio se propone determinar de qué madera carbonizada se trata. Para ello, se procede mediante fractura del carbón hecha con la mano orientada hacia los tres planos anatómicos: transversal, longitudinal tangencial y longitudinal radial. Cada una de estas tres secciones se observa en un microscopio de reflexión. Esta técnica sencilla y rápida permite estudiar un gran número de muestras sin ningún tipo de manipulación química que las contamine. Los carbones, una vez determinados, pueden ser recuperados para efectuar dataciones radiométricas.

Los carbones pueden también observarse a través del microscopio electrónico de barrido para una mayor precisión de ciertos detalles anatómicos, gracias a la profundidad de campo que este instrumento posee. La anatomía de las diferentes especies presenta una amplia variabilidad; se determinada aquélla ayudándose de claves de identificación propuestas por atlas morfológicos, completados con colecciones de referencia de especies actuales carbonizadas y ficheros fotográficos de las mismas. Se llega fácilmente al nivel taxonómico de género y de especie; sólo los géneros de leguminosas ofrecen todavía alguna ambigüedad, y lo mismo puede decirse de las especies de los géneros *Juniperus* (enebros), *Salix* (sauces) y ciertas ericáceas atlánticas, debido también a la mala conservación de las muestras. La ambigüedad se extiende a los robles caducifolios y *Betula* (abedules); si bien en estos casos hay que culpar a posibles hibridaciones.

Una vez efectuado el análisis cualitativo, se procede al tratamiento cuantitativo de los datos. La unidad de base considerada es un fragmento de carbón arbitrario. Otros autores prefieren, por unidad de base, la masa media o peso de los carbones. Obviamente, la identificación botánica requiere el estudio de cada fragmento de carbón, no cada gramo de carbón. Adviértase, además, que cada taxón presenta una sobrefragmentación o subfragmentación, que influye en la frecuencia relativa del número de fragmentos.

Ambos parámetros, el fragmento y la masa media, conducen a resultados paleoecológicos equivalentes. Y así hemos utilizado el número de fragmentos, vía más cómoda y rápida a la hora de efectuar análisis antracológicos de un muestrario abundante.

La interpretación antracológica se basa en la variación de las frecuencias relativas de cada taxón. Pero, ¿cuál es el número mínimo de carbones a estudiar para obtener una imagen fiable de la vegetación? Para responder a esa pregunta se crean curvas taxonómicas que ponen el número de taxones identificados en función del número de fragmentos analizados. En dichas curvas podemos observar que el número de taxones aumenta con el número de fragmentos analizados. A partir de cierto umbral, la curva tiende a estabilizarse. De acuerdo con la investigación realizada en Montpellier, esa cifra oscila entre 100 y 600 fragmentos. Las curvas taxonómicas que







Curva taxonómica del nivel 21c de la cueva de Santa Catalina (Cantabria). En las fotografías, flores de Crataegus monogyna *(arriba) y* Prunus amygdalus *(abajo)*

Ciencia y sociedad

Ciencias del cuaternario

La antracología

En el ámbito de las ciencias relativas a la era cuaternaria, la antracología, que estudia la madera carbonizada procedente de los yacimientos arqueológicos, ocupa un lugar destacado. Estos carbones vegetales son restos de fuegos de funcionalidad diversa.

La madera que el hombre trae al asentamiento puede agruparse en dos categorías principales: madera de manufactura, para la construcción y talla de objetos artesanales o domésticos, y madera combustible, para hacer fuego. Estas dos categorías ofrecen una doble clase de información. Por un lado, la madera combustible interesa a la paleoecología o arqueobotánica; por otro, las maderas de manufactura importan en paleoetnología o arqueoetnobotánica.

La madera combustible constituye un buen punto de apoyo para la reconstrucción de paleopaisajes, y en esa línea de trabajo ha descollado la llamada escuela de Montpellier. A través de la identificación de las especies leñosas (árboles y arbustos) encontradas en los yacimientos, y teniendo en cuenta sus condiciones de vida y su relación con otras especies, se recrea el paisaje vegetal con las formaciones o biotopos en torno a los asentamientos humanos. De este modo, se traza la evolución y variaciones que el paisaje vegetal ha ido sufriendo a lo largo del tiempo, como consecuencia de las fluctuaciones climáticas y de la presión que el hombre ha ido ejerciendo en el medio.

El fuego intencionado, la recogida de leña y los trayectos recorridos introducen un filtro cultural que condiciona el espectro antracológico resultante. A su vez, ponen de manifiesto la estrecha relación entre el hombre y su entorno.

La metodología de estudio se divide en dos partes. La primera tiene lugar en el yacimiento, donde se recogen los carbones en campañas sucesivas. La segunda, de laboratorio, consiste en la determinación anatómica de las muestras y en el subsiguiente tratamiento de datos.

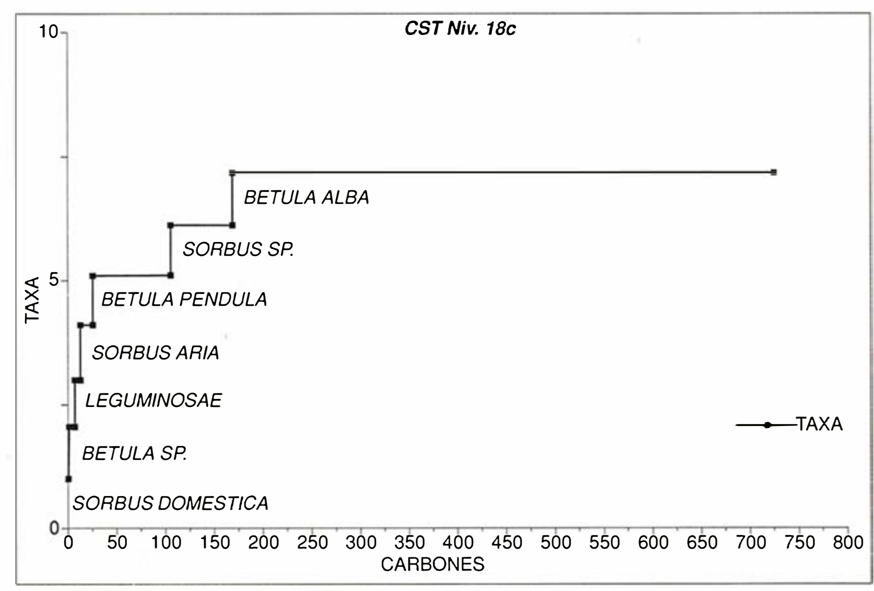
Se procura que la recogida de carbones y restos orgánicos sea exhaustiva. El grado de conservación de carbones en el sedimento varía de una zona a otra. Los yacimientos estudiados hasta ahora en la región mediterránea han ofrecido siempre abundantes restos gracias a una recuperación sistemática a través del cribado de sedimento. Pero otras regiones, así la cantábrica, sometida a un clima atlántico, no ofrecen posibilidades tan óptimas para la conservación de los carbones.

Por su tamaño mínimo, no resulta fácil darse cuenta de la presencia de carbones, que, además, al encontrarse impregnados en arcilla, son muy quebradizos. Para que la recuperación sea eficaz, se emplea la técnica de flotación: se introduce el sedimento en una cubeta llena de agua donde se disuelve un producto, el calgón, para disolver los carbonatos; debido a su baja densidad, los carbones flotan y van desgajándose de un sedimento arcilloso sin destruirse ni fragmentarse; se recuperan con ayuda de un colador y van depositándose en el recipiente correspondiente, etiquetado. El secado de las muestras se efectúa al aire libre o en un secador de aire caliente; se prefiere lo segundo si nos encontramos en zonas donde la humedad ambiente es constante.

Cuando coinciden un sedimento apelmazado y carbones muy pequeños, no basta con el proceso de flotación. La recuperación se lleva a cabo durante la siguiente etapa: la criba del sedimento con agua. Se dispone el sedimento en cribas de 5 milímetros para la fracción gruesa y en cribas de 2 milímetros para la fracción fina, y va lavándose cuidadosamente con agua corriente. Las cribas se dejan secar y se procede a una labor de selección de carbones y demás restos orgánicos.

Cada yacimiento presenta sus propias características. La funcionalidad, contexto cultural y económico del mismo condicionarán la intensidad con que el sitio fue ocupado y las veces que fue frecuentado. Todo esto va a influir en el espectro antracológico resultante: variedad de taxones, abundancia o escasez de carbones, etcétera.





Representación, a la derecha, de la curva taxonómica del nivel 18c de la cueva de El Castillo (Cantabria). En la fotografía de la izquierda se recorta un bosque de abedules

que el acetilbenzoilo es tóxico a dosis muy bajas, del orden de 1 micromol por caja; por encima de estas dosis, el número de revertientes es menor que la propia cifra de revertientes espontáneos. A dosis inferiores no se detectó actividad mutagénica: el número de revertientes no difiere del de espontáneos. (Las medidas de actividad mutagénica se dan en revertientes por micromol.)

Otro compuesto, el glioxilato sódico, resultó ser inactivo. En este caso, se pudo llegar a dosis más elevadas sin que el producto mostrara toxicidad. Ahora bien, una tendencia creciente nos indica que es activo frente a la estirpe TA100, aunque con una potencia mutagénica muy baja. Algo semejante ocurre con la canforquinona. Los aldehídos son claramente mutagénicos, pues el número de revertientes netos es proporcional a la dosis, registrándose hasta 2500 revertientes por caja. Superan de lejos a las de las cetonas, lo que se explica por la mayor reactividad del grupo carbonilo en el primer caso.

El mecanismo de acción de los mutágenos se relaciona con la interacción con los restos de guanina de los ácidos nucleicos y, por tanto, con la capacidad para formar aductos con dichos restos. Las reacciones de formación de aductos se han estudiado fundamentalmente por espectroscopía en el ultravioleta y en el visible, pero existe un inconveniente para el uso de esta técnica, aparte de su baja sensibilidad: sólo puede utilizarse con glioxal y metilglioxal, que no dan espectro en la zona de longitudes de onda empleadas; no puede usarse el resto de los compuestos estudiados, ya que absorben fuertemente a dichas longitudes de onda.

Por tanto, se hace necesario plantear otro enfoque experimental. Ahora bien, las técnicas electroquímicas presentan el problema de que hay que conocer muy bien los procesos de oxidación o reducción de los reactivos. Afortunadamente, los compuestos α-dicarbonílicos han recibido especial atención y su comportamiento electroquímico se conoce con suficiente detalle.

Los compuestos dicarbonílicos suelen estar hidratados en disolución acuosa. Para poder determinar las constantes de formación de los aductos, hemos de calcular las constantes de equilibrio de hidratación, KH. En todos los casos hemos utilizado la voltametría de barrido lineal de potencial a velocidades de barrido suficientemente altas; hemos recurrido, pues, a técnicas electroquímicas. Se han calculado las constantes de hidratación de los diferentes derivados carbonílicos en función de la temperatura, para obtener en cada caso la variación de entalpía del proceso de hidratación. Los valores de KH nos permiten calcular las actividades mutagénicas corregidas por la hidratación, ya que es el compuesto dicarbonílico libre el que reacciona con los restos de guanina para producir esta actividad.

COMPUESTO	ACTIVIDAD REVERTIENTES/ MICROMOL	K_H(25°C)	ENTALPIA DE HIDRATACION KILOCALORIAS/MOL	ACTIVIDAD REVERTIENTES/ MICROMOL
GLIOXAL	51	207**	-9,11**	$3,7 \times 10^6$
METILGLIOXAL	921	1279	-13,67	10×10^6
FENILGLIOXAL	278	400	—	$1,1 \times 10^6$
DIACETILO	7,7	1,9	-3,55	22,8
3, 4 - HEXANODIONA	0,9	2,1	-2,65	2,8
1, 2 - CICLOHEXANODIONA	12	117	-13,02	-1450
ACETILBENZOILO	TOXICO	1,5	-2,25	—

* Referida a dosis de dicarbonilo libre ** Monohidrato

Constantes de hidratación a 25 grados Celsius, entalpías de hidratación y actividades mutagénicas corregidas según las dosis de dicarbonilo libre

En los aldehídos, la actividad mutagénica del fenilglioxal es menor que la del metilglioxal y la de éste, inferior a la del glioxal; en las cetonas, la actividad mutagénica de la canforquinona es menor que la de la 3,4-hexanodiona, inferior a la del diacetilo. De lo que se infiere que disminuyen al aumentar el tamaño del sustituyente; y de ese modo parece que es el efecto estérico el que determina la actividad dentro de cada grupo, por encima de los factores electrónicos. Teniendo en cuenta la influencia de los efectos estéricos se podría calcular la actividad del acetilbenzoilo, que resulta ser semejante a la de la 3,4-hexanodiona.

La distinta actividad de cada grupo de compuestos debe guardar relación con las diferencias moleculares del agrupamiento α-dicarbonílico, que se ve alterado por los sustituyentes adyacentes a los átomos de carbono, lo que se traduce en variaciones de las energías de los orbitales HOMO y LUMO, responsables de la reactividad.

Los potenciales de reducción se pueden relacionar con la energía del LUMO de las moléculas. Así pues, podemos tomar dichos potenciales como parámetros relacionados con la estructura molecular. Se observa entonces una correlación positiva entre la actividad mutagénica corregida y el potencial de onda media, por lo que se concluye que la actividad mutagénica está relacionada con la energía del LUMO del agrupamiento α-dicarbonílico y, por tanto, con la estructura de los compuestos estudiados.

Las constantes de formación de los aductos entre los compuestos α-dicarbonílicos y guanina y guanosina se han obtenido también por técnicas electroquímicas, a partir de la influencia de esta reacción química sobre los procesos de reducción. Los valores de KF en el caso de la guanosina son alrededor de 10 veces mayores que los conseguidos con guanina. Conocidas las variaciones de KF con la temperatura, podemos

COMPUESTO	K_F(GUA)	ENTALPIA DE HIDRATACION	K_F(GUO)	ENTALPIA DE HIDRATACION
DIACETILO	$2,9 \times 10^4$	-17,02	$3,0 \times 10^5$	-19,84
3, 4 - HEXANODIONA	$4,2 \times 10^4$	-16,96	$4,2 \times 10^5$	-22,16
1, 2 - CICLOHEXANODIONA	$9,5 \times 10^4$	-22,72	$2,7 \times 10^7$	-24,75
METILGLIOXAL	$9,1 \times 10^6$	-28,98	$1,0 \times 10^8$	-26,05
FENILGLIOXAL	$1,2 \times 10^7$	-7,10*	$8,5 \times 10^7$	-4,73*

* Valor de $\Delta H_F - \Delta H_H$

Constantes de formación a 25 grados Celsius y entalpías de formación de los aductos con guanina (GUA) y guanosina (GUO)

nosotros hemos construido ofrecían una amplia variabilidad, ya que la riqueza en taxones no siempre estaba en relación con el número de fragmentos estudiados. Los ejemplos de la cueva del Castillo y la de Santa Catalina son ilustrativos.

Las razones de una mayor o menor estabilidad de las curvas taxonómicas hay que buscarlas en el tipo de formación vegetal que se pretende reconstituir y, sobre todo, en el hombre y el tipo de actividades económicas ejercidas en cada período cultural. En otras palabras, se trata de incluir el contexto arqueológico y al hombre en el centro de la antracología: admitir la selección humana de todos los carbones, dispersos o concentrados.

Los resultados de la flora tienen que interpretarse en términos de vegetación. Para ello es necesario un conocimiento de la vegetación potencial de la zona circundante a cada yacimiento, así como de la repartición de las diferentes asociaciones vegetales de la región entera. El punto de partida sería, pues, la vegetación actual, primeramente a través del estudio ecológico de cada taxón (autoecología) y, de ahí, pasar a la sinecología o estudio de las agrupaciones vegetales. Si cada taxón posee un nicho característico, será factible la interpretación estructurada de los carbones dispersos y concentrados. En la región cantábrica, la distinción entre concentrado y disperso nos ofrecía siempre la misma diversidad florística. Las investigaciones concernientes a otras zonas peninsulares (Andalucía oriental) y Canarias parecen llegar a las mismas conclusiones. Se ha de cotejar los resultados paleoecológicos y paleoclimáticos con una las secuencias de referencia regionales de la zona, ya que éstas ofrecen una dinámica continua y general de las fluctuaciones climáticas a lo largo del Pleistoceno superior y Holoceno.

El hombre se halla, pues, en el centro de la antracología. El es quien realiza las recogidas diarias de leña en un medio que le ofrece recursos económicos de diversa índole. Las características físicas de la región y el tipo de economía son dos factores importantes. El resultado de todo ello nos conduce a la reconstitución de las relaciones hombre-medio bajo una óptica paleoeconómica, otro tipo de información que, unido a la reconstrucción y evolución del paleopaisaje, enriquecerá las interpretaciones antracológicas de la madera en cuanto combustible.

¿Qué podemos decir ahora del uso de la madera para la fabricación de utensilios o construcción? Hemos aludido al interés de la escuela de Montpellier por la madera combustible, "le bois du feu", punto de partida de la antracología. Pero tampoco se ha olvidado de la etnobotánica, por más que la mayoría de las veces se trata de aspectos particulares, como puede ser el consumo de frutos.

El hombre empleó también los carbones para pintar. Un trabajo reciente efectuado en cuevas cántabro-pirenaicas y que reúne antracología, dataciones y estudios de arte rupestre, ha ofrecido resultados interesantes.

En resumen, un espectro antracológico puede ser objeto de diferentes niveles de interpretación: paleoecológico, paleoeconómico, paleoclimático, paleoetnológico o arqueobotánico. Todo depende del aspecto que queramos poner de relieve, aunque para nosotros todos ellos forman un conjunto indisociable y de él depende la mayor o menor riqueza interpretativa. (*Paloma Uzquiano, de la Universidad de Montpellier.*)

Química física

Dicarbonilos mutágenos

Los compuestos carbonílicos (R–CO–R′) se hallan extensamente distribuidos en nuestro entorno. Además de su utilización en la industria química, son componentes de alimentos, metabolitos intermediarios y productos de peroxidación de los lípidos, y pueden alcanzar concentraciones bastante altas en el organismo. Los compuestos α-dicarbonílicos se encuentran en cantidades apreciables en café, mantequilla, cerveza y otros alimentos. En experimentos realizados con la cepa *Salmonella typhimurium* TA100 en el test de Ames, se ha establecido que estos compuestos poseen actividad mutagénica.

El uso de bacterias como material de ensayo es práctica habitual en toxicología genética. Por constituir los ácidos nucleicos el vehículo universal de la información genética, cualquier daño producido sobre ADN bacteriano debe ser extrapolable, aunque con ciertas limitaciones, a los demás organismos; ello explica la estrecha relación entre mutagénesis inducida en *Salmonella* (la capacidad para producir mutaciones en estos microorganismos) y carcinogénesis en mamíferos.

El test de Ames utiliza estirpes mutantes de *S. typhimurium* incapaces de crecer en medios carentes de histidina. Nosotros nos hemos servido de la estirpe TA100, en cuyo ADN la secuencia original de un codon (CTC, que determina el aminoácido leucina) se sustituye por otro triplete (CCC, que codifica la prolina) en el mutante. Cuando se forme la cadena complementaria del ADN del mutante aparecerá, por tanto, la secuencia GGG en un sitio específico.

Las cepas de *S. typhimurium* se muestran sensibles a la acción de mutágenos: carecen, por deleción, del gen que determina el sistema reparador de escisiones y presentan pérdida parcial de los lipopolisacáridos de la pared bacteriana, lo que incrementa su permeabilidad ante moléculas que normalmente no la atraviesan. Además, la presencia de un plásmido, pKM101 o factor R, merma la capacidad del sistema reparador del ADN.

En el ensayo, se colocan unos mil millones de bacterias mutantes en un medio de cultivo sin histidina, donde no pueden medrar. Se añade el compuesto α-dicarbonílico, que provoca el tránsito de la secuencia GGG a la GAG, sustitución del nucleótido central que supone la reversión a la forma original de la bacteria. Las bacterias así mutadas pueden desarrollarse en un medio sin histidina y formar colonias. El número de estas colonias refleja la potencia del compuesto α-dicarbonílico o la actividad mutagénica.

El mecanismo molecular de la actividad mutagénica de los α-dicarbonilos se ha relacionado con la capacidad que éstos poseen para formar aductos con restos de guanina de los ácidos nucleicos. (Llámase aducto al compuesto donde se ha producido la adición del derivado α-dicarbonílico a la molécula de guanina.) Para el autor, las actividades mutagénicas dependen de la estructura de los compuestos α-dicarbonílicos y de su reactividad química, esto es, de su capacidad para formar aductos.

Para demostrarlo, escogimos una serie de posibles mutágenos; se estudiaron las actividades mutagénicas y sus reacciones con guanina y guanosina. En primer lugar, se comprobó

ERRATUM

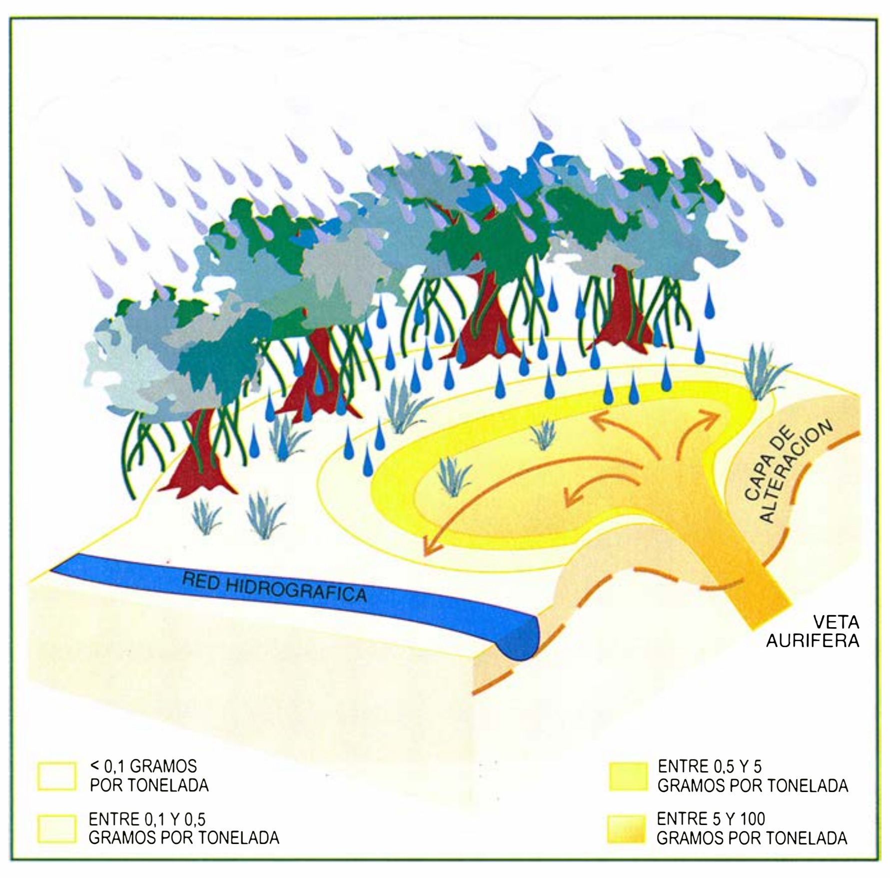
En la figura de la página 33 del número 207, los 1288 pb atribuidos al gen de la transposasa deben desglosarse como sigue: 1017 pb que codifican el gen de la transposasa; 161 pb de la región reguladora de dicho gen; 46 pb de la región terminal del mismo; 32 pb de la región repetida, e invertida, a ambos extremos del gen.

progresiva, que actúa en la vertical de las vetas auríferas, y una dispersión lateral en el seno de las capas superficiales de la capa de alteración; estos movimientos se deben a las aguas de torrentera superficiales, a la actividad de la microfauna y a la de la vegetación. Como el tamaño de las partículas y su peso disminuyen con la alteración, desplazarlas es cada vez más fácil, y terminan por formar en la superficie del suelo halos centrados en el filón; su diámetro puede alcanzar algunos centenares de metros, es decir, se extienden lo suficiente para unirse a la red hidrográfica que drena la colina.

¿Por qué las partículas de oro, metal en teoría inatacable, se depositan de esta forma? Cuando se separan de sus homólogas, presentan una mayor superficie a los agentes corrosivos. En el bosque ecuatorial de Gabón, las aguas de lluvia son ricas en iones de cloro, procedentes del océano Atlántico; y cuando atraviesan la vegetación y las capas superficiales del suelo, se enriquecen en ácidos fúlvicos, ácidos orgánicos liberados por la intensa actividad biológica; de esta manera y en semejante medio, los iones cloruro y los radicales orgánicos forman complejos con el oro. Coexisten tres tipos de complejos: $Au(OH)_3(H_2O)$, $AuClOH^-$ y $Au(OH)2R^-$ (donde R es un radical orgánico).

Estos complejos auríferos, estables en las condiciones del bosque ecuatorial, pueden abandonar la capa de alteración y pasar a los sistemas hidrológicos locales. Marc Bénédetti y Jacques Boulègue, del Instituto de Física del Globo de París, han mostrado que el río Congo arroja cada año varias toneladas de oro en el océano Atlántico. Calculamos que los fenómenos de alteración son responsables de la pérdida del 80 al 90 por ciento del oro inicial, y que un halo de dispersión lateral de un centenar de metros de radio tarda varios cientos de miles de años en formarse.

Se derrumba un mito: el oro no es inalterable. No sólo en el subsuelo del bosque ecuatorial, sino en numerosos suelos ácidos del planeta. Estos resultados se aplican actualmente en la prospección minera del oro: a partir del tamaño, la composición química y el aspecto de los granos de oro, se deducen informaciones sobre la eventual presencia de un yacimiento en profundidad; la estructura del halo y las concentraciones en la superficie nos dan información sobre el contenido en oro, la posición y la forma del yacimiento, del que sólo queda entonces por determinar, mediante sondeo, la profundidad. (*Fabrice Colin, de la Universidad de Aix-Marsella III.*)



*En la colina de Dondo Mobi, al sur del Gabón, las lluvias cargadas de iones cloruro y ricas en ácidos orgánicos arrancan partículas de oro de la veta aurífera. La concentración en oro de la roca alterada disminuye desde las profundidades, donde la roca madre está intacta, hasta el suelo, donde está disgregada. En la superficie de la capa de alteración, las partículas se dispersan fácilmente (*flechas de color*) y forman un halo, en el que la concentración de oro disminuye desde el centro hacia la periferia*

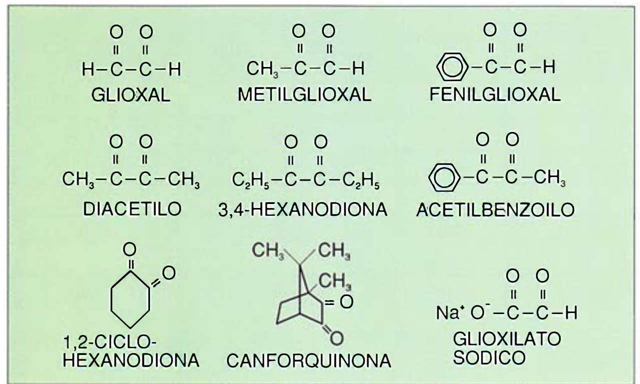
NASA

Megadificultades para macroproyectos

En los últimos meses la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) ha padecido una interminable racha de mala suerte. El inventario de infortunios incluye hasta la misteriosa pérdida de contacto con el *Mars Observer*, que dio al traste con la misión. El propio encuentro de la sonda espacial *Galileo* con el asteroide Ida, en agosto del año pasado, se vio comprometido por un incurable problema en la capacidad transmisora de la antena, que mermó las posibilidades del experimento para enviar información sobre Ida.

En la ciencia espacial son inevitables algunos tropiezos. Ningún cohete es fiable del todo. Tampoco los instrumentos gozan de absoluta garantía. Pero los recientes percances de la NASA provocan una reacción de frustración, porque afectan a macroproyectos cuyos errores significan costes altísimos para los contribuyentes y los mismos científicos. Pese a la filosofía de "más barato, rápido y mejor", promovida por el actual gestor del organismo espacial, Daniel S. Goldin, todavía sobreviven algunos grandes programas que revolotean incontrolados, aunque no siempre dentro de la NASA.

La misión de exploración a Marte permanece como un ejemplo vivo de cuán difícil puede ser enderezar el rumbo de la agencia espacial. Hace más de diez años, se propuso que el *Mars Observer* inaugurara una nueva generación de vehículos espaciales eficientes y económicos de la clase "Observer". Máquinas con un diseño común y dotadas de ingeniería de punta. La NASA persigue estos mismos objetivos en las misiones de la clase "Discovery", la primera de las cuales sería, por ironía del destino, ir a Marte. "Misiones como las del *Discovery* están hoy en la misma si-



Estructuras y nombres usuales de los compuestos dicarbonílicos, esto es, R–CO–CO–R', estudiados (izquierda). *Aductos formados con restos de guanina por aldehídos α-dicarbonílicos (R–CO–CO–H), a la derecha. En la parte superior se muestra un aducto cíclico, donde ha reaccionado el carbonilo cetónico con el grupo imino del ciclo para dar un enlace covalente, mientras que en la parte inferior se muestra un aducto cuasicíclico en el que se aprecia la formación de un puente de hidrógeno que confiere cierta rigidez a la estructura*

averiguar las variaciones de entalpía para las reacciones de formación de los aductos. Los valores de las constantes de formación permiten establecer la siguiente ordenación decreciente, tanto para los aductos con guanina como con guanosina: 3,4-hexanodiona – diacetilo – 1,2-ciclohexanodiona – metilglioxal – fenilglioxal – glioxal. Sobre la base de las entalpías de formación de los aductos, la ordenación decreciente será 3,4-hexanodiona – diacetilo – 1,2-ciclohexanodiona – metilglioxal.

Estas ordenaciones son iguales a las encontradas al examinar las actividades corregidas. Significa ello que la estabilidad del aducto está relacionada con la actividad mutagénica y, cuanto más estable sea el aducto, mayor será la actividad mutagénica del compuesto en cuestión. En consecuencia, podemos establecer una relación directa de causa a efecto entre la reactividad química (capacidad para formar aductos) y la actividad mutagénica de este tipo de compuestos. (*José Miguel Rodríguez Mellado, del departamento de química física y termodinámica aplicada de la Universidad de Córdoba.*)

Oro en polvo

Alteración química en los suelos ácidos

Decir que el oro es un valor seguro es repetir una trivialidad, a no ser que, como muestran nuestras investigaciones, no dure más que otros metales.

Durante la década de los ochenta, diversos organismos promovieron la búsqueda de oro, sobre todo en los países del cinturón tropical, donde la economía depende esencialmente de los recursos naturales. En ese decenio progresaron mucho las técnicas de prospección por análisis químico de suelos, aguas y plantas. Hoy en día se detectan trazas cada vez menores del metal precioso, hasta el nanogramo (10^{-9} gramos) por kilogramo de material bruto. Así, se han efectuado campañas de exploración en Africa, India, Indonesia y América del Sur.

En este contexto, el Ministerio de Minas de Gabón ha emprendido un programa de investigación básica y aplicada sobre el comportamiento del oro en los bosques ecuatoriales; este programa, dirigido por el ORSTOM francés, ha agrupado a diferentes socios. Hemos estudiado anomalías auríferas en el subsuelo de la pluviselva ecuatorial; estábamos convencidos de que un mejor conocimiento de los mecanismos de dispersión del oro facilitaría la prospección de este metal en un ambiente donde es difícil penetrar y los costes de prospección son elevados.

En Gabón reina un clima húmedo ecuatorial; el bosque es denso, con árboles de más de treinta metros de altura. Las lluvias ácidas se enriquecen en materia orgánica cuando atraviesan la vegetación y la hojarasca del suelo; actúan sobre las rocas y las ahuecan y transforman en un manto rojizo de alteración, resultado de las interacciones de la parte superior de la litosfera, los fluidos que envuelven al planeta (el aire y el agua) y la biosfera de origen animal y vegetal. Esta capa será tanto más espesa cuanto más estables permanezcan la roca madre a partir de la que se desarrolla y el clima, durante miles de años éste, durante cientos de millones de años aquélla. En Gabón, donde se reúnen estas condiciones, el espesor de la cubierta de alteración sobrepasa a veces los cien metros.

En varias regiones de este país se han detectado, en el seno de la capa de alteración, partículas de oro que representaban concentraciones comprendidas entre 0,1 y 5 gramos por tonelada de material. Para saber si las trazas detectadas a treinta centímetros de profundidad podrían indicar la presencia de yacimientos profundos, había que esclarecer los mecanismos físico-químicos que controlan el comportamiento del oro, desde la roca madre hasta el suelo.

Cuando las aguas ácidas y ricas en materia orgánica alcanzan un filón profundo o un cuerpo mineralizado rico en oro, lo atacan, y las partículas de oro, inicialmente empotradas en una matriz de cuarzo, se desprenden. El tamaño de las partículas así liberadas y la concentración en oro de la roca alterada disminuyen desde las profundidades, donde la roca madre está intacta, hasta el suelo, donde se ha disgregado por completo. Las partículas de oro de las rocas intactas están constituidas por la agregación de granos cristalizados de superficie homogénea y no porosa. Por el contrario, las partículas extraídas de la capa de alteración están formadas generalmente por granos aislados, redondeados, con la superficie sembrada de cavidades; el número y el tamaño de éstas aumenta a medida que se va estando más cerca de la superficie del suelo, hasta que acaban por unirse. Estos vacíos y el aspecto romo de los granos prueban que el oro se disuelve en el seno de la capa de alteración. La disolución se acompaña igualmente de una pérdida más importante de plata, elemento que constituye el 10 por ciento de las partículas intactas de oro y un cierto porcentaje de las partículas alteradas.

Las partículas sufren una alteración



Superficie de una partícula de oro, extraída cerca de la superficie del suelo en Gabón: los poros indican la disolución del metal (× 700)

en el área más contaminada, pero Bertazzi ya había previsto que fuera así. Las personas de la zona más afectada, no muchas, se mudaron inmediatamente, de modo que su exposición fue breve. Los de la zona B sufrieron una exposición menos intensa, pero más prolongada.

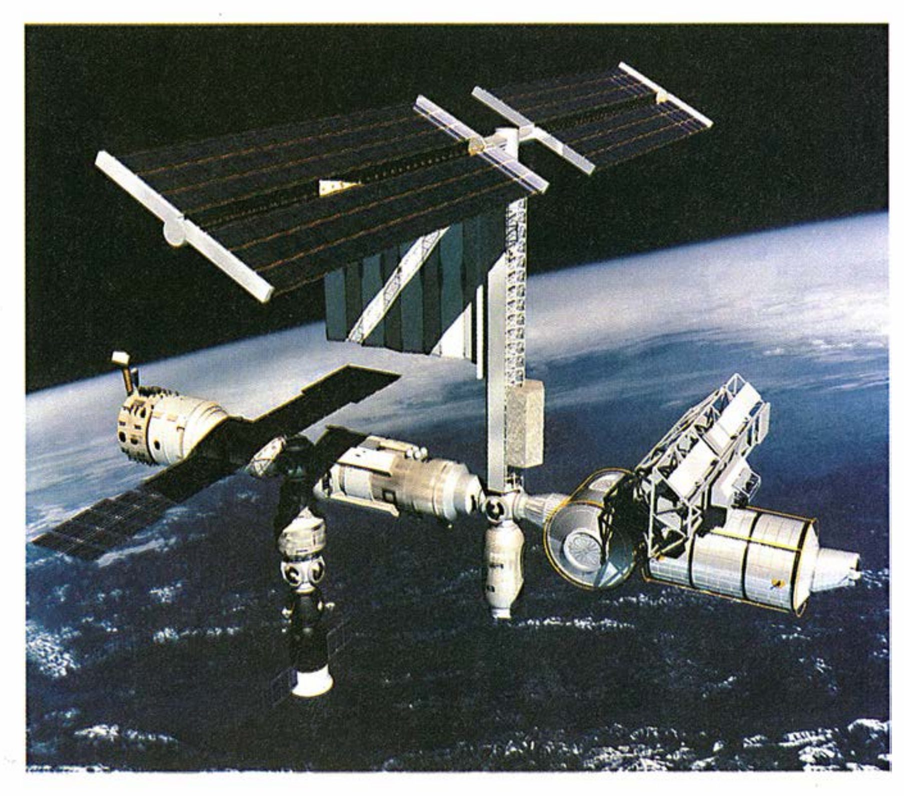
No es la primera vez que se relaciona la dioxina con el cáncer en humanos. Estudios de diversa índole iban descubriendo pruebas a favor y en contra de esa conexión. El interés de la investigación de Seveso reside en que allí se ha controlado la población y se han empleado nuevas técnicas de medición de los niveles de dioxina en sangre (factor decisivo para la determinación exacta del grado de exposición). Bertazzi ha basado sus resultados en extrapolaciones de datos obtenidos del suelo, pero afirma que los análisis de las muestras de sangre concuerdan con su cálculo.

El estudio de Seveso es importante incluso por lo que en él no se ha visto que ocurriese. Bertazzi observa que la incidencia de casos de cáncer de mama y de cáncer endometrial es inferior a la normal. “Los resultados vienen a ser un reflejo casi perfecto de los datos relativos a animales”, apostilla Ellen K. Silbergeld, de la Universidad de Maryland. Y aclara: ambos tumores los induce el estrógeno; puesto que la dioxina actúa como antiestrógeno, es probable que proteja de los dos.

Los hallazgos de Seveso llegan en un momento en que empezamos a disponer de abundante información sobre los efectos moleculares de la dioxina. Se sabe que la forma 2, 3, 7, 8-tetraclorodibezo-para-dioxina (el más potente de los 75 tipos de dioxina) se une a un receptor intracelular. El receptor cargado con la dioxina se unce entonces a un transportador, que porta el complejo hasta el núcleo de una célula y activa una enzima, la citocromo p450. “Cuando el complejo interacciona con el ADN, altera la estructura del cromosoma”, explica James P. Whitlock, Jr., de la Universidad de Stanford. Los cambios consiguientes en la expresión génica respaldan la hipótesis según la cual la dioxina aviva el cáncer provocado por otra sustancia.

Según otros estudios, la dioxina opera como las hormonas y ejerce su acción sobre el sistema inmunitario y el aparato reproductor. Sherry E. Rier, de la Universidad del Sur de Florida, sostiene que en los monos rhesus la dioxina va asociada a endometriosis. El Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambientales de EE.UU. está investigando si se da esta asociación en las mujeres. Richard E. Peterson, de la Universidad de Wisconsin, y otros han observado que la dioxina causa cambios neuroconductuales en las ratas y que, según parece, altera el desarrollo del sistema reproductor. Hallazgos similares se han visto en una población de Taiwan intoxicada por un análogo de la dioxina: los niños que quedaron expuestos en el seno materno nacen con penes más pequeños que los niños no expuestos.

“La dioxina es un desregulador muy potente”, observa Linda Birnbaum, de la Oficina norteamericana de Protección Ambiental. “Tiene efectos distintos en diferentes sistemas orgánicos y etapas del desarrollo.” Pero el artículo de Bertazzi no es la última palabra sobre Seveso. George W. Lucier, bioquímico del Instituto de Ciencias de la Salud Ambientales, y otros investigan la inducción del citocromo p450 en los residentes de Seveso para comprobar si tiene que ver con el desarrollo de cáncer. (*Marguerite Holloway.*)



Estación espacial ruso-americana, según la maqueta generada por ordenador. Refleja el nuevo espíritu internacional que puede ayudar a revitalizar la propia NASA

tuación en que se encontraban, hace diez años, experimentos de observación como los del *Observer*", abunda Larry W. Esposito, de la Universidad de Colorado, implicado en el anteproyecto de una posible misión del *Discovery* a Venus.

Sin embargo, la clase "Observer" nunca convenció al Congreso estadounidense, como tampoco logró la aprobación de la Oficina de Gestión y Presupuestos, por lo que el *Mars Observer* quedóse en ejemplar único. No sólo se perdió la prima de ahorro asociada a toda fabricación en serie, sino que el proyecto del *Mars Observer* creció en complejidad y gastos: científicos y gestores de la NASA se empeñaron en exprimir toda su capacidad. Con la explosión del transbordador *Challenger* en 1986, el programa sufrió largos retrasos que contribuyeron a engrosar su ya abultado coste.

Sin conseguir su objetivo en Marte el *Observer* se llevó por delante 850 millones de dólares, lo que costaron los instrumentos preparados para recoger información sobre la geología, mineralogía y el clima de Marte. Esta hubiera sido la primera misión al planeta desde el lanzamiento del *Viking* en 1976. Pero el *Mars Observer* interrumpió su comunicación con la Tierra justo antes de alcanzar su destino. Lo que, una vez más, hace cierto que, en cuestión de proyectos, no conviene poner todos los huevos en el mismo cesto.

La verdad es que el plan de la NASA sobre Marte contempla ya misiones más baratas y diversificadas. En 1996 espera lanzar un soporte tecnológico para el *Servicio de reconocimiento ambiental de Marte* (*MESUR*), integrado en una red de una docena de estaciones distribuidas por el planeta. El *MESUR* podría traer aires internacionales a la agencia espacial americana, como se vio en la conferencia celebrada en Wiesbaden en mayo del año pasado por representantes de la NASA, la Agencia Espacial Europea y la Agencia Espacial Rusa, para coordinar sus respectivos planes de investigación sobre Marte.

La estación espacial arrastra años de retraso y miles de millones de dólares por encima del presupuesto previsto por el entonces presidente Reagan. Este proyecto se libró, por un solo voto, de la desaparición, suerte de la que se ha visto privado el Superconductor Supercolisionador (SSC), un experimento de física de altas energías.

El respiro vital que disfruta ahora la estación espacial lo paga el creciente clima de entendimiento entre los Estados Unidos y Rusia. Al Gore, vicepresidente de los Estados Unidos, y el primer ministro ruso Viktor S. Chernomyrdin firmaron, en agosto de 1993, un acuerdo de cooperación entre los programas espaciales de las dos naciones.

En ese marco, Daniel S. Goldin acaba de exponer las líneas maestras de un proyecto, de tres etapas, para acoplar la estación *Alpha*, americana, con la estación rusa *Mir* en el año 2001. El director de la NASA argumenta que este arreglo puede ahorrar hasta 3500 millones de dólares.

Diríase, pues, que la controvertida estación espacial se halla destinada a conducir la NASA hacia un futuro, más rentable, de cooperación internacional, alejándola de proyectos autárquicos como el *Mars Observer*. Para operar ese cambio de rumbo, la NASA necesita una profunda reestructuración, que planifique a largo plazo y gestione mejor. (*Corey S. Powell.*)

Procesamiento de la dioxina

Oncovinculación

La dioxina es un contaminante que ha tenido siempre algo de paradójico. Para los animales de laboratorio es un potente carcinógeno, pero en los seres humanos parecía que tuviera una débil conexión con el cáncer. Sin embargo, en un estudio reciente, realizado con personas expuestas a su acción, se aportan pruebas convincentes de sus efectos carcinogénicos.

Desde 1976, año en que un accidente industrial arrojó dioxina a la atmósfera cerca de la ciudad italiana de Seveso, se ha venido siguiendo la salud de unas dos mil familias de aquella zona. Hace varios años, un grupo de investigadores halló, junto al aumento de las afecciones cardiovasculares, un incremento de ciertos tipos de cáncer.

El mismo equipo de expertos ha confirmado, con nuevas investigaciones, la tesis de la carcinogenicidad de la dioxina para las personas. En *Epidemiology*, Pier Alberto Bertazzi y colaboradores, de la Universidad de Milán, dan cuenta de una mayor incidencia de determinados tumores entre la población de Seveso. La probabilidad de contraer cáncer hepático ha sido casi el triple de lo normal entre las personas que vivían en la segunda zona más contaminada, la B. Además, en ese mismo grupo cierta forma de mieloma aparecía entre las mujeres con una frecuencia 5,3 veces mayor que la normal y algunos cánceres de la sangre se volvían, para los hombres, 5,7 veces más probables.

No se ha encontrado, en cambio, un aumento significativo de cánceres

tintos entre sí han dado lugar a unas mismas vías metabólicas por caminos evolutivos distintos, o comparten quizás un antepasado común?

Aunque las preguntas siguen en pie, el hecho de que las cianobacterias produzcan saxitoxina y neosaxitoxina ha permitido descifrar otro enigma. Las dificultades que entrañaba el cultivo *in vitro* de dinoflagelados impedían conocer la vía biosintética de la producción de las toxinas. El descubrimiento de esa vía metabólica llegó en 1984, a raíz de las investigaciones del equipo de Yuzuru Shimizu, de la Universidad de Rhode Island, trabajando con especies de *Aphanizomenon*.

Las neurotoxinas cianobacterianas, productos letales, ofrecen su lado esperanzador. Pero no están tan extendidas como las hepatotoxinas, el otro tipo principal. Si a las neurotoxinas se ha achacado la muerte de animales en Norteamérica (con algunos casos en Gran Bretaña, Australia y Escandinavia), se ha culpado a las hepatotoxinas de bajas acaecidas en los cuatro puntos cardinales. De ahí el interés con que se recibió, a comienzos de los ochenta, el establecimiento de la estructura química de una toxina hepática por el grupo de Dawie P. Botes, de Pretoria. Se sabía que tales toxinas eran péptidos (pequeñas cadenas de aminoácidos), pero hasta los años setenta no se obtuvieron los medios técnicos necesarios para la determinación precisa de sus estructuras.

Poco después de que Botes estableciera la identidad química de las primeras hepatotoxinas, mi laboratorio y el de otros confirmaron sus resultados y comenzó a conocerse la composición química de otras hepatotoxinas. El análisis estructural, acometido sobre todo en el laboratorio de Kenneth L. Rinehart, de la Universidad de Illinois, ha mostrado que las toxinas del hígado forman una familia de al menos 53 péptidos cíclicos, o anulares, emparentados entre sí. Los que están constituidos por siete aminoácidos reciben el nombre de microcistinas; los formados por cinco aminoácidos, nodularinas. Estos nombres reflejan su origen: las toxinas se aislaron primero de miembros de los géneros *Microcystis* y *Nodularia*.

La investigación sobre hepatotoxinas se propone esclarecer su acción sobre el organismo. Sabemos que los péptidos instan la retracción de los hepatocitos, células funcionales del hígado; y éstas, de ordinario muy empaquetadas, se separan. Cuando los hepatocitos se separan, las células que forman los capilares sinusoidales del hígado se separan también. Entonces, la sangre que llega por los vasos inunda el tejido hepático y se acumula allí, provocando alteraciones locales del tejido con resultado frecuente de shock.

Se van aclarando otros aspectos del proceso de intoxicación. ¿Por qué las toxinas actúan de preferencia sobre el hígado? La respuesta parece tener que ver con su ingreso en los hepatocitos a través del sistema de transporte, exclusivo de estas células, responsable de la penetración de las sales biliares hacia su interior.

Maria T. C. Runnegar, de la Universidad de California del Sur, y Ian R. Falconer, de la Universidad de Adelaida, se han adelantado en el estudio de la deformación de los hepatocitos causada por las toxinas. Su trabajo y el más reciente de Val R. Beasley, de la Universidad de Illinois, y John E. Erikson, de la Universidad de Abo, han revelado que las toxinas desarticulan las células hepáticas al actuar sobre el citoesqueleto, armazón de hebras proteicas que, entre otras funciones, le cumple la de dar forma a las células.

Los principales componentes citoesqueléticos afectados por las toxinas son los filamentos intermedios y los microfilamentos, polímeros proteicos. Sin solución de continuidad se van añadiendo y perdiendo subunidades de los filamentos intermedios; sin cesar tampoco, las hebras proteicas que tejen los microfilamentos se asocian y disocian. Pero los tamaños de la red de los filamentos intermedios y de los microfilamentos cambian muy poco a lo largo del tiempo. Las microcistinas y las nodularinas parecen inclinar el equilibrio hacia la pérdida y disociación de subunidades. Suponemos que son los filamentos intermedios los primeros en verse afectados, y a continuación los microfilamentos. Conforme el citoesqueleto se encoge, las digitaciones a través de las cuales los hepatocitos interaccionan con las células vecinas se retraen, interrumpiendo el contacto de la célula con otros hepatocitos y con capilares sinusoidales.

Otros estudios más cercanos han aportado alguna pista sobre el mecanismo empleado por las toxinas para desencajar los componentes del citoesqueleto. La investigación en microcistinas y nodularinas ha puesto de manifiesto que las toxinas son potentes inhibidores de las proteína fosfatasas. Estas enzimas funcionan en concierto con otras enzimas —proteína quinasas— para regular el número de grupos fosfato de las proteínas. Las quinasas añaden grupos fosfato; las fosfatasas los eliminan.

Es cosa sabida que las reacciones de fosforilación y desfosforilación influyen sobre la estructura y función de filamentos intermedios y microfilamentos. Parece, por tanto, que las toxinas desencajan las fibras al alterar el equilibrio regulador normal entre fosforilación y desfosforilación. Se admite, en particular, que la actividad incontrolada de las quinasas y la consiguiente fosforilación excesiva de los filamentos intermedios y los microfilamentos (o de proteínas que actúan sobre ellos) aumentan la velocidad de la pérdida y disociación de subunidades.

El descubrimiento de que las hepatotoxinas cianobacterianas inhiben las proteína fosfatasas trae a primer plano la posibilidad alarmante de que una exposición a dosis no letales fomente el desarrollo de tumores. Además de influir sobre la estructura y función de las fibras citoesqueléticas, las proteína quinasas y las proteína fosfatasas desempeñan un papel fundamental en la regulación de la división celular. Las quinasas, reguladas a su vez por diversas proteínas, instan el movimiento de las células durante el ciclo de división celular. Las proteína fosfatasas intervienen en el control de la división celular amortiguando la actividad de los reguladores. Las toxinas, al bloquear las fosfatasas, facilitan probablemente la acción de las proteínas activadoras de quinasas y, en consecuencia, ayudan a soltar los frenos de la proliferación celular.

El equipo de Hirota Fujiki, del Centro Saitama de Estudios sobre el Cáncer, ha demostrado que, en cultivos celulares y en el animal entero, las microcistinas y nodularinas aceleran el desarrollo tumoral. No parece que estas toxinas desencadenen la progresión de una célula hacia su transformación cancerosa; sin embargo, una vez que algún otro factor haya disparado los cambios iniciales, las hepatotoxinas promueven el desarrollo de ulteriores alteraciones carcinogénicas. Mis colaboradores de Ohio, nuestros colegas de la Academia China de Ciencias en Wuhan y los de la Universidad Médica de Shangai se han propuesto averiguar si esta actividad contribuye a la transformación tumoral en el hombre. A tal fin, estamos realizando un estudio a largo plazo con personas residentes en China que sufren una exposición repetida a microcistinas a través del agua potable. Tememos que la altísima tasa de cáncer hepático en algunas zonas de China

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

Parecer y ser

De las mariposas al cuco, los animales saben muy bien que importa más parecer que ser. Sobre todo si se asemejan al más fuerte, garrido y peligroso. Les va la vida. Primero, sin embargo, conviene no tentar la suerte exponiéndose a un riesgo gratuito.

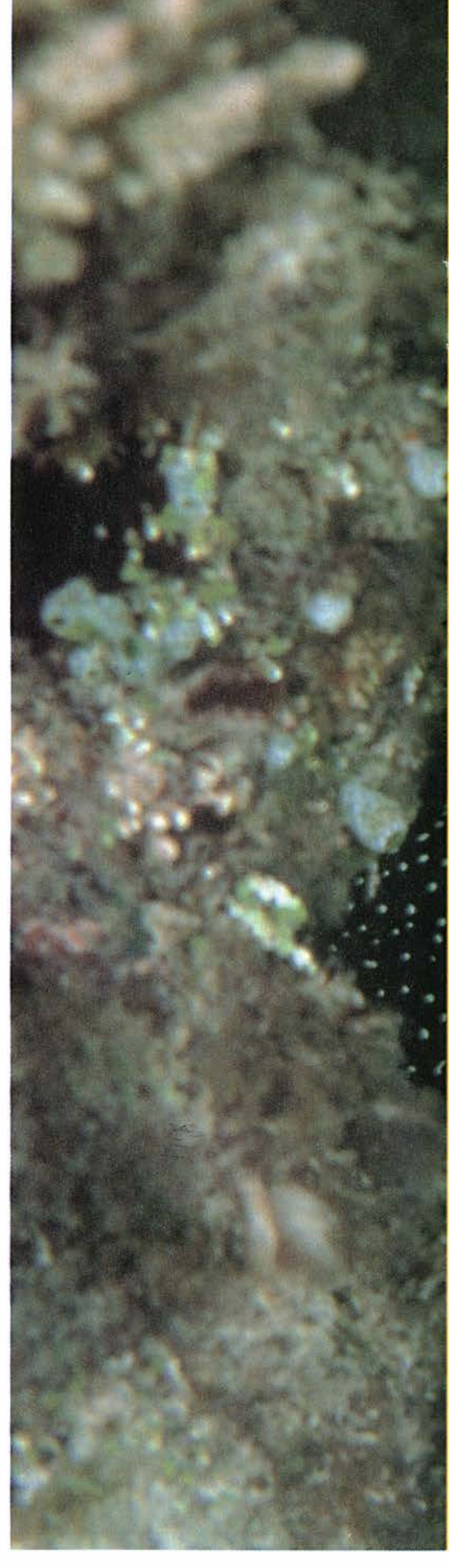
Es justamente lo que hace *Calloplesiops altivelis*, uno de los plesiónidos más hermosos de los arrecifes coralinos de los mares calientes. En los días de sol, prefiere la paz de las sombras y los abrigos roqueños de la plataforma a la luz destellante que reverbera en las madréporas. De cuerpo firme, cabeza redondeada y línea lateral partida en dos, viste con una librea verdeoscura moteada de pintas blancas.

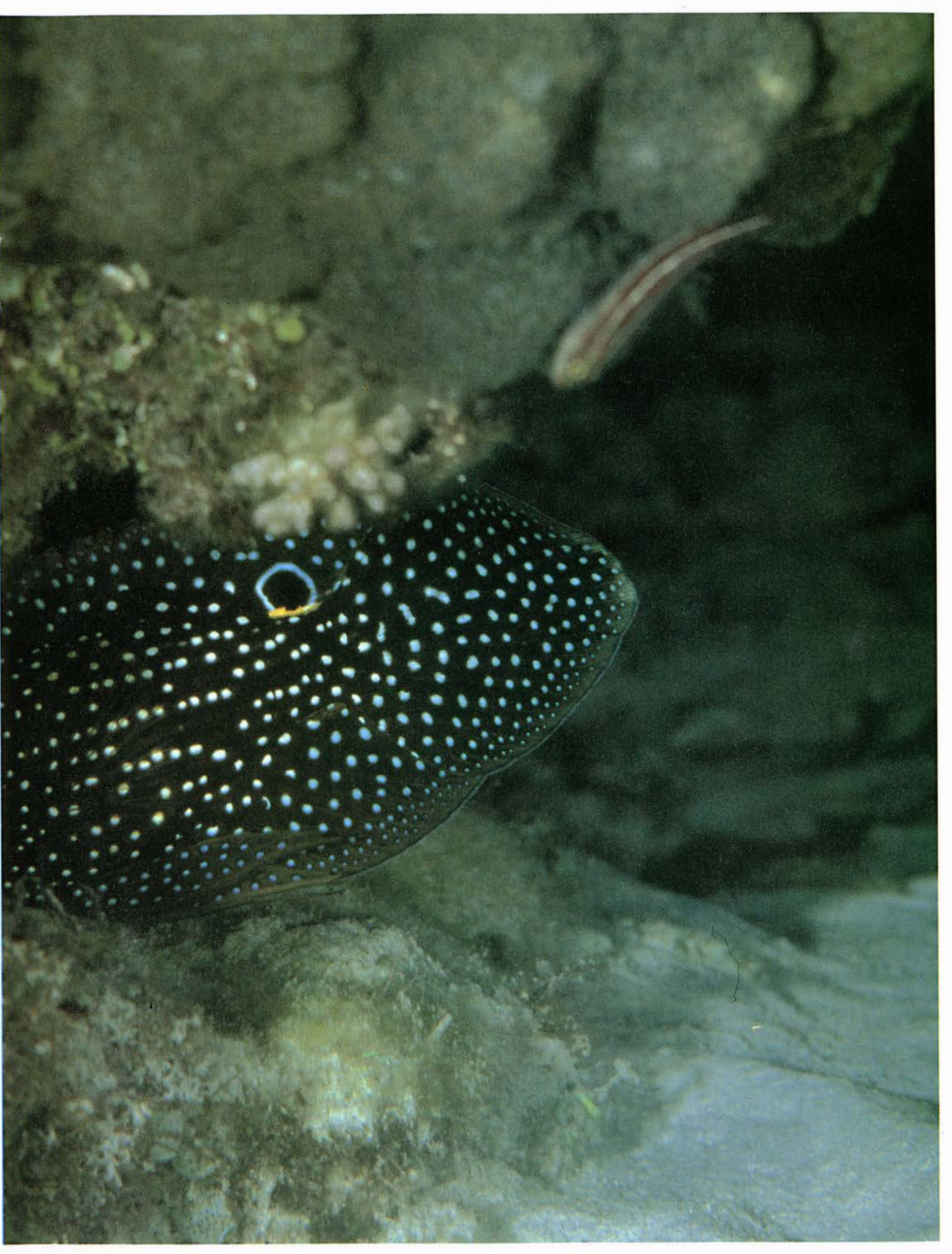
Sale de su escondite al atardecer. Pero si sospecha la presencia de un depredador, torna a su refugio. No entra del todo; deja medio cuerpo fuera. Cualquiera podría confundirlo con la morena *Gymnothorax meleagris*. De eso se trata, exactamente, de que el agresor piense que habrá de habérselas con el veneno de ésta. Se da en *Calloplesiops altivelis* lo que los etólogos denominan un fenómeno de mimetismo batesiano, aquel en que especies indiferentes o inofensivas adoptan el mismo uniforme de las especies advertidoras o aposemáticas para despistar, en su camuflaje, al enemigo. No quiera saber el lector lo que me costó captarlo en todas sus dimensiones.

Foto de la izquierda
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 5,66
tiempo de exposición: 1/60 segundos
película: ISO = 25

Foto de la derecha
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
tiempo de exposición: 1/60 segundos
película: ISO = 25







Resolución de problemas irresolubles

Cabe ahora resolver problemas que sería imposible computar, con tal de que nos conformemos con lo que sucede en promedio

Joseph F. Traub y Henryk Woźniakowski

Aunque los matemáticos y los científicos se encuentran, sin duda, entre las personas más racionales del mundo, con frecuencia estarán dispuestos a admitir que son víctimas de un maleficio. Son muchas las personas que padecen en alguna de sus formas este sino, llamado maleficio de dimensión. Pensemos en una familia normal ante una nueva promoción bancaria; al cabeza de familia puede resultarle harto difícil decidir si debe refinanciar o no la hipoteca de su casa con un préstamo a 15 o a 30 años, pues la decisión depende de la interacción de gastos mensuales, ingresos, fiscalidad, tipos de interés y otras muchas variables inciertas.



1. Un problema posiblemente intratable.

Los problemas de la ciencia son mucho más esotéricos y puede sostenerse que mucho más difíciles de afrontar. En el diseño de fármacos asistido por ordenador, pongamos por caso, podría ser necesario conocer cuán estrechamente se ligará a su receptor biológico un hipotético principio activo. Suponiendo que el número de átomos del fármaco, del disolvente y del receptor biológico sea de unos 8000, una cifra típica, y dado que para describir la posición de cada átomo se requieren tres variables espaciales, el cálculo entraña unas 24.000 variables. Dicho con sencillez, cuantas más variables o dimensiones sea preciso considerar, más difícil resultará llevar a cabo una tarea. En muchos problemas, la dificultad crece exponencialmente con el número de variables.

El maleficio dimensional puede llevar los trabajos, hasta niveles de dificultad en los cuales resultan inabordables. Si bien es cierto que los científicos disponen de potentes ordenadores, los problemas pueden tener tantísimas variables que ningún futuro aumento de la velocidad de cómputo permita resolverlos en un plazo razonable.

¿Es posible tornar tratables los problemas intratables, es decir, es posible resolverlos en tiempos de cómputo relativamente limitados? En ocasiones, por suerte, la respuesta es afirmativa. Pero hemos de estar dispuestos a arreglarnos sin la garantía de lograr que nuestros cálculos sólo adolezcan de errores pequeños.

Ciertas clases de problemas con muchas variables (los problemas multivariantes) resultan abordables si se acepta que el error sea pequeño en la mayoría de los casos (en lugar de exigir que sea pequeño siempre). Uno de los autores de este artículo (Woźniakowski) ha demostrado formalmente que tal método funciona por lo menos en dos clases de problemas matemáticos que se presentan con frecuencia en las tareas científicas e ingenieriles. La primera es la integración, una de las técnicas fundamentales del cálculo. La segunda consiste en la reconstrucción de superficies, en la cual se utilizan informaciones fragmentarias para reconstruir un objeto, técnica que constituye la base de la obtención de imágenes para diagnóstico médico.

También campos ajenos a la ciencia pueden beneficiarse de los métodos de rotura de la intratabilidad. Las instituciones financieras, tomemos el hilo del ejemplo anterior, suelen tener que asignar un valor a un fondo hipotecario, que resulta afectado al refinanciar sus créditos los titulares de hipotecas. Si suponemos un fondo de hipotecas a treinta años y permitimos una refinanciación

mensual, esta tarea contiene 30 años por 12 meses, o sea, 360 variables. Una dificultad añadida estriba en el valor del fondo, que depende de las tasas de interés a lo largo de los próximos 30 años y las cuales son, obviamente, desconocidas.

Describiremos las causas de intratabilidad y mencionaremos las técnicas que en ocasiones nos permiten vencerla. Esta cuestión pertenece a una nueva especialidad, la complejidad basada en información, que examina la complejidad computacional de problemas de los que no podemos obtener una resolución exacta. También nos detendremos brevemente en la forma en que la complejidad basada en información podría permitirnos demostrar que ciertas cuestiones científicas no podrán jamás recibir respuesta, porque no existen en el universo los recursos computacionales necesarios. De ser así, esta condición impondría límites sobre lo científicamente cognoscible.

La complejidad basada en información se centra, sobre todo, en la dificultad computacional de los llamados problemas continuos. Tenemos un ejemplo en el cálculo de los movimientos de los planetas. Tales movimientos están regidos por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, ecuaciones que describen la posición de los planetas en función del tiempo. Dado que el tiempo puede tomar cualquier valor real, se dice que el modelo matemático correspondiente es continuo.

Los problemas continuos difieren de los problemas discretos (por ejemplo, las ecuaciones en diferencias finitas), en los cuales el tiempo sólo toma valores enteros. Las ecuaciones en diferencias se presentan en el análisis de problemas como la predicción del número de depredadores en un estudio de poblaciones que formen sistemas del tipo de depredador-presa o la estimación de los niveles previstos de contaminación de una laguna.

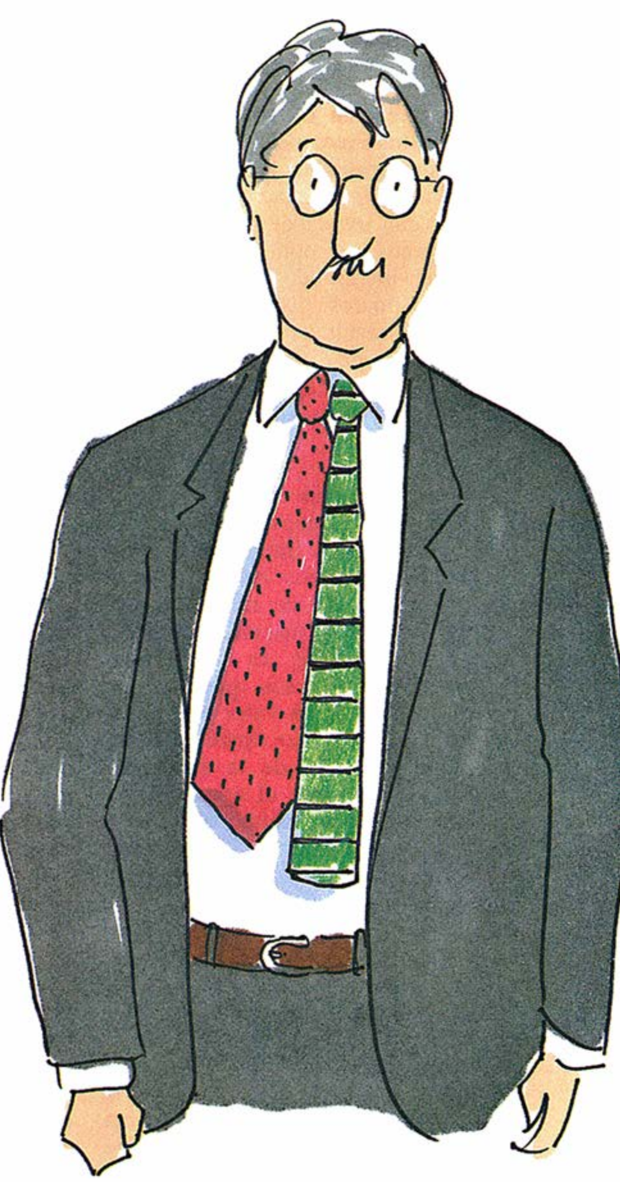
Sin embargo, en el hacer cotidiano de la ciencia y la tecnología predominan las formulaciones matemáticas continuas. Abunda, entre ellas, una multitud de problemas, como las ecuaciones diferenciales ordinarias y en derivadas parciales, las ecuaciones integrales, la optimización lineal y no lineal, la integración y la reconstrucción de superficies. En tales formulaciones resulta harto frecuente que el número de variables sea muy grande. Por ejemplo, los cómputos de química, del diseño de fármacos y de la metalurgia suelen entrañar el cálculo de las posiciones espaciales y los momentos de millares de partículas.

Suele ocurrir que la dificultad intrínseca de garantizar la precisión de las soluciones numéricas crezca exponencialmente con el número de variables, lo que acaba por hacer que el problema supere la capacidad resolutiva de los ordenadores, por potentes que éstos sean. El crecimiento es tan explosivo que en muchos casos se hace imposible garantizar una solución numérica adecuada, incluso en situaciones que comportan tan sólo un pequeño número de variables.

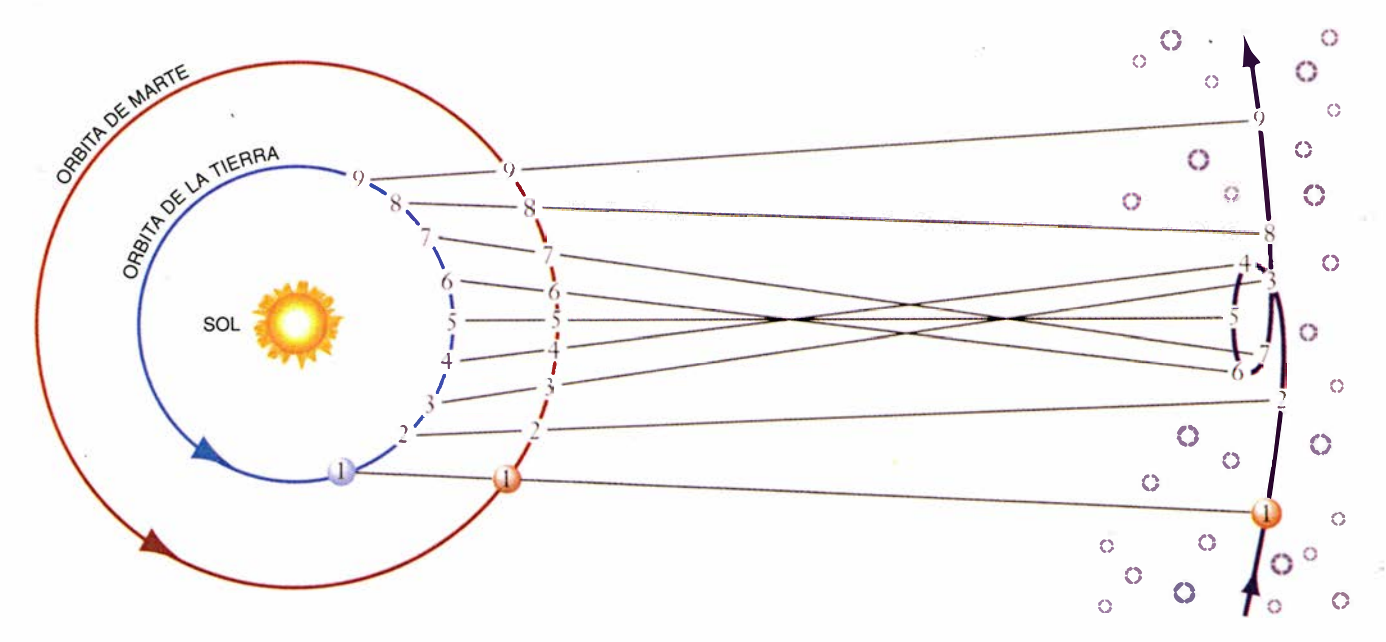
Con el fin de formular con mayor precisión en qué consiste la intratabilidad y de considerar posibles remedios, vamos a tomar como ejemplo el cálculo del área limitada bajo una curva. Tal proceso se parece al de hallar el área de la región vertical que ocupa en una estantería una ristra de libros. Más explícitamente, nos proponemos hallar el área comprendida entre dos topes que sostienen un grupo de libros. Podemos suponer, sin pérdida de generalidad, que los topes se encuentran en 0 y en 1. En matemática este proceso de sumación se denomina integración definida. (Hablando con más precisión, se considera que la región está ocupada por un número infinito de libros, cada uno de ellos infinitesimalmente delgado.) La información matemática que se da para resolver este problema recibe el nombre de integrando y consiste en una función que describe el perfil de los libros que hay en nuestra estantería.

En los cursos de matemáticas se aprende a calcular integrales definidas mediante una serie bien determinada de reglas de cálculo simbólico. Los valores que así obtienen los estudiantes son exactos. Pero la mayoría de los problemas de integración que se presentan en la práctica revisten mayor complejidad y hacen imposi-

JOSEPH F. TRAUB y HENRY WOŹNIAKOWSKI han estado colaborando desde 1973. Traub, titular de la Cátedra Edwin Howard Armstrong de Ciencias de Cómputo en la Universidad de Columbia, fue director del departamento de informática de la Universidad Carnegie-Mellon y primer presidente del Computer Science and Telecommunications Board de la norteamericana Academia Nacional de Ciencias. En 1959, sus investigaciones abrieron el campo de la teoría de complejidad basada en información. Traub agradece a los investigadores del Instituto de Santa Fe las numerosas y estimulantes conversaciones relativas a los límites del conocimiento científico. Woźniakowski ha sido director del departamento de matemáticas, ciencias de cómputo y mecánica de la Universidad de Varsovia; fue también presidente del sindicato Solidaridad en dicha institución. En 1988 recibió el Premio Mazur de la Sociedad Matemática Polaca. Los autores manifiestan su gratitud a la Fundación Nacional sobre la Ciencia y a la Comisión de Investigaciones Científicas del Ejército del Aire estadounidense por su ayuda.



2. Posible solución de un problema intratable.



3. EJEMPLO DE COMPLEJIDAD BASADA EN INFORMACION: el cálculo de los movimientos de los planetas. Tales movimientos están regidos por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, ecuaciones que describen la posición de los planetas en función del tiempo. Dado que el tiempo puede tomar cualquier valor real, se dice que el modelo matemático correspondiente es continuo. La ilustración representa el movimiento aparente de un planeta visto desde la Tierra en movimiento.

ble la aplicación de los procesos de cálculo simbólico; no queda más remedio que calcular la integral mediante una aproximación numérica, esto es, con ayuda de un ordenador. En concreto, se opta por hallar el valor del integrando en un número finito de puntos. Estos valores del integrando resultan de las llamadas operaciones de información. Después, se combinan adecuadamente dichos valores y se obtiene el resultado.

Pero el mero conocimiento de esos valores no determina por completo al verdadero integrando. Como únicamente podemos hallar el valor del integrando en un número finito de puntos, la información disponible sobre el integrando es parcial; en consecuencia, sólo nos queda, como mucho, encontrar un valor aproximado de la integral. Lo típico es especificar la exactitud de la aproximación expresando que el error del valor obtenido yace dentro de cierto margen de tolerancia. Dicho error suele representarse en matemática por la letra griega épsilon, ε.

Pero ni siquiera podemos alcanzar esta meta sin introducir restricciones adicionales. El conocimiento de los valores del integrando en los puntos 0,2 y 0,5, pongamos por caso, nada nos dice sobre la curva entre esos dos puntos; curva que podría desarrollar entre ellos una forma cualquiera, y limitar por consiguiente el área que se quisiera. En nuestro símil de la estantería, se diría que hemos insertado un tomo de arte entre una tanda de libros de bolsillo. Para garantizar que el error no excede de ε, se precisa disponer de información global acerca del integrando. Puede ser necesario suponer, por ejemplo, que la pendiente de la función es siempre menor que 45 grados, o tal vez, que en ese estante hay sólo libros de bolsillo.

En resumen, en aquellas investigaciones que requieran el cálculo de integrales se requerirá, por lo general, determinarlas numéricamente mediante ordenador, al cual se le proporcionan los valores del integrando en ciertos puntos. El ordenador entrega un número que es aproximación de la integral.

Estamos ahora en condiciones de introducir la fundamental noción de complejidad computacional. Deseamos hallar la dificultad intrínseca del problema de integración. Supongamos que la determinación de valores del integrando y las operaciones de tipo combinatorio, como la adición, la multiplicación o la comparación, tengan cada una un costo dado. El costo podría consistir simplemente en el tiempo que el ordenador necesita para realizar la operación. Podríamos entonces definir la complejidad computacional de esta operación de integración como el costo minimal requerido para garantizar que la solución computada se encuentra a menos de un error umbral ε del valor auténtico. Las operaciones de información y el algoritmo combinatorio que minimicen el costo son optimales.

Existen teoremas que demuestran que la complejidad computacional de este problema de integración es del orden del recíproco del error umbral (1/ε). Dicho de otro modo, se puede elegir un conjunto de operaciones de información y un algoritmo combinatorio de tal manera que el costo de aproximación de la solución ronde en torno a 1/ε. No hay forma de proceder mejor. En el caso unidimensional, o sea, de una sola variable, el problema es bastante sencillo. La complejidad computacional resulta inversamente proporcional a la precisión deseada.

Pero cuando este problema de integración se plantea con mayor número de dimensiones, la complejidad computacional aumenta exponencialmente con el número de variables. Si denotamos por d al número de variables, la complejidad es del orden $(1/ε)^d$, vale decir, el recíproco del umbral de error elevado a un exponente igual al número de variables. Si deseamos conseguir una precisión de ocho cifras al computar una integral triple (o sea, si el error ha de ser menor que 0,00000001), la complejidad ronda la cifra 10^{24}. Expuesto de otro modo, haría falta alrededor de un cuatrillón de valores del integrando para conseguir tal grado de exactitud. Admitiendo generosamente la existencia de un ordenador secuencial capaz de hallar 10.000 millones de valores de la

función por segundo, la tarea requeriría 100 billones de segundos, que son más de tres millones de años. Incluso una computadora dotada de un millón de procesadores seguiría exigiendo 100 millones de segundos, unos tres años.

Para poder analizar con mayor generalidad los problemas multivariantes hemos de introducir un parámetro adicional, llamado *r*. Tal parámetro representa la lisura o suavidad de los datos matemáticos ingresados en el ordenador. "Suavidad" significa que las entradas consisten en funciones cuya variación no es brusca y exagerada, o como se dice en matemáticas, que todas las derivadas parciales de orden menor o igual que *r* están acotadas. El parámetro de suavidad toma solamente valores enteros no negativos; cuanto más elevados, mayor lisura presentan los datos. Por lo tanto, $r = 0$ representa una suavidad mínima. (Hablando técnicamente, los integrandos sólo son continuos: pueden mostrar un perfil bastante aserrado, pero siguen formando una sola línea continua.)

Son numerosos los problemas cuya complejidad computacional es del orden de $(1/\varepsilon)^{d/r}$. Para quienes dispongan de una formación más técnica, la integración múltiple, la reconstrucción de superficies, las ecuaciones en derivadas parciales, las ecuaciones integrales y la optimización no lineal constituyen problemas con este orden de complejidad computacional.

Una vez fijados el umbral de error y el parámetro de suavidad, la complejidad computacional depende exponencialmente del número de dimensiones. Por eso, el problema se torna inabordable para dimensiones grandes.

Puede incluso que se presente un obstáculo más serio aún que la intratabilidad; a saber, que el problema sea insoluble. Decimos que un problema es insoluble cuando no es posible computar a costo finito ni tan siquiera una solución aproximada. Tal acontece cuando los datos matemáticos de entrada corresponden a una función continua cuya gráfica es muy irregular. El parámetro de lisura o suavidad es cero y la complejidad computacional se hace infinita. Por tanto, para muchos problemas de gran número de variables, la tarea de garantizar que una solución aproximada tiene un error deseado se torna insoluble o intratable.

Matemáticamente hablando, los resultados sobre complejidad computacional que hemos descrito se aplican al denominado "caso más desfavorable" del planteamiento determinístico. La expresión "caso más desfavorable", o pésimo, nace de la técnica de aproximación, que proporciona garantías de un error inferior a ε. Dicho de otra forma, en el caso de la integración múltiple se garantiza que la aproximación no se sale del umbral de error para todo integrando de lisura dada. El calificativo "determinístico" proviene de que el integrando se evalúa en puntos determinísticos (en lugar de serlo en puntos tomados al azar).

Son muchos los problemas determinísticos que resultan insolubles o intratables en este planteamiento determinístico de caso más defavorable o pésimo. Dado que estos resultados son intrínsecos al problema, no cabe eludirlos inventando otros métodos.

Una posible vía para abrir brecha en la insolubilidad e intratabilidad de los problemas reside en la aplicación de métodos estocásticos. Para ilustrar el funcionamiento de los métodos estocásticos nos valdremos nuevamente de la integración múltiple. En vez de elegir los puntos determinísticamente, incluso de forma óptima, haremos que sea (por decirlo así) una moneda la que decida por nosotros. Los sondeos preelectorales nos ofrecen una idea aproximada del método. En lugar de consultar a todos los electores censados, el encuestador se basa en una muestra pequeña, elegida al azar, para determinar cuál de los contendientes será el probable vencedor.

Existen teoremas que demuestran que, con una selección aleatoria de puntos, la complejidad computacional es a lo sumo del orden del recíproco del cuadrado del umbral de error $(1/\varepsilon^2)$. Así pues, el problema es

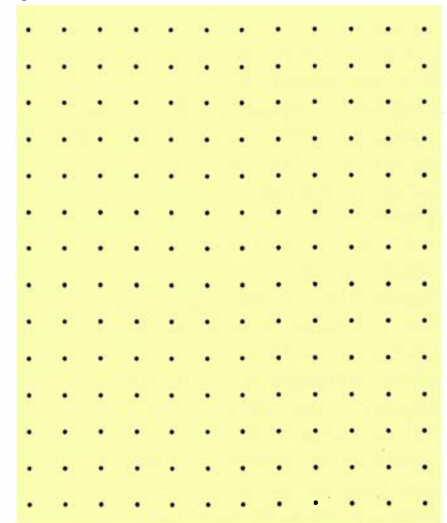
Desarrollo de un método estocástico

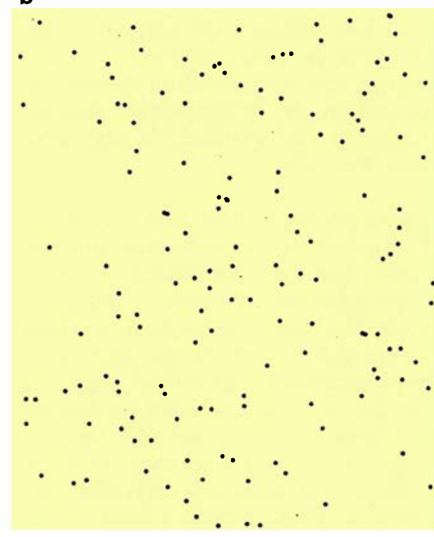
En los años cuarenta, los físicos que trabajaban en el Proyecto Manhattan en el Laboratorio Nacional de Los Alamos se convencieron de que algunos de los problemas que estaban esforzándose en resolver, como el movimiento de los neutrones al atravesar un material, eran inabordables mediante cálculos determinísticos. Recurrieron entonces al método de Montecarlo, ideado por Nicholas C. Metropolis y Stanislaw M. Ulam. La potencia de este método proviene de que su error no depende del número de variables del problema. Por tanto, cuando es aplicable, logra vencer el maleficio dimensional. La versión clásica del método de Montecarlo para la integración múltiple requiere, a lo sumo, del orden de $1/\varepsilon^2$ evaluaciones del integrando en puntos seleccionados al azar, siendo ε la cota de error. Un enunciado equivalente es que, si el integrando se evalúa en *n* puntos tomados al azar, el error de aleatorización esperado es a lo sumo del orden de $1/\sqrt{n}$. El método de Montecarlo y sus variantes han demostrado su utilidad en el cálculo de multitud de fenómenos, que van desde el tamaño de las lluvias cósmicas hasta la infiltración de líquidos a través de sólidos.


Stanislaw M. Ulam, 1909-84

En el caso de la integración múltiple, la versión clásica del método de Montecarlo sólo resulta óptima cuando el parámetro *r* de suavidad de los integrandos es igual a cero. En 1959, el matemático ruso N. S. Bakhvalov inició los primeros trabajos tocantes a la complejidad computacional de la integración múltiple por métodos estocásticos e ideó una alternativa al método de Montecarlo. Más tarde, en 1988, Erich Novak, de la Universidad de Erlangen-Nuremberg, generalizó el trabajo de Bakhvalov y estableció que la complejidad computacional en un planteamiento aleatorio es del orden de $(1/\varepsilon)^s$, siendo $s = 2/(1 + 2r/d)$. Señalemos que $0 < s \leq 2$. Si el parámetro de suavidad *r* es igual a cero, resulta que $s = 2$, y en tal caso el método de Montecarlo es optimal. Por otra parte, si *r* es positivo el método de Montecarlo deja de ser optimal, pudiendo utilizarse en su lugar el método de Bakhvalov.

4. LOS PUNTOS DE MUESTREO indican dónde deben calcularse los valores de las funciones en los métodos de aleatorización y de caso promedio. Por claridad en la figura, los puntos han sido representados en el plano. Los puntos seleccionados pueden ocupar posiciones regulares y equidistantes, como los nodos de una retícula (*a*), o encontrarse diseminados al azar (*b*). Otros dos tipos de distribución, los llamados puntos de Hammersley (*c*) y los puntos de cruce hiperbólico (*d*), corresponden a posiciones optimales para el método del caso promedio.





siempre abordable, aun cuando el parámetro de suavidad sea igual a cero.

El caballo de tiro del método estocástico ha sido el llamado método de Montecarlo, idea propuesta por Nicholas C. Metropolis y Stanislaw M. Ulam en los años cuarenta de nuestro siglo. En el método de Montecarlo clásico, el integrando se evalúa en puntos elegidos al azar con una distribución estadística uniforme. La media aritmética de los correspondientes valores de la función sirve entonces como aproximación de la integral.

Bastante sorprendentemente, en el caso de problemas de integración múltiple un tratamiento aleatorio de este tipo logra hacer que la complejidad computacional del problema no dependa de la dimensión. Problemas que son insolubles o intratables por computación desde puntos determinísticos óptimos se tornan tratables con métodos aleatorios. (Sin embargo, si *r* es positivo, el método de Montecarlo clásico no es óptimo.)

Pero no se obtiene tanto a cambio de nada. El precio que estamos obligados a pagar para abrir brecha en la intratabilidad o la irresolubilidad es el sacrificio de la garantía absoluta de que el error sea menor que ε. En su lugar nos queda sólo la garantía, más débil, de que probablemente el error no va a ser mayor que ε, como ocurre en los sondeos preelectorales, que suelen dar pronósticos correctos, aunque de cuando en cuando fallan de forma estrepitosa. Dicho de otro modo, resulta imposible garantizar lo que ocurrirá en el caso más desfavorable; hemos de conformarnos con una garantía más débil.

Los métodos aleatorios logran que la integración múltiple y otros muchos problemas importantes se tornen computacionalmente factibles. Por ejemplo, en 1987, Greg W. Wasilkowski, de la Universidad de Kentucky, demostró que la aleatorización no basta para vencer la intratabilidad del problema de la reconstrucción de superficies. ¿Existirá algún método para doblegarla, que sea utilizable para una clase amplia de problemas matemáticos?

Lo hay, en efecto. Nos referimos al llamado método del caso promedio, en el cual se intenta vencer la intratabilidad y la insolubilidad reemplazando la garantía para el caso pésimo por otra más débil: que el error medio (o en términos más técnicos, la esperanza matemática del error) sea menor o igual que ε. En el método del caso promedio se imponen restricciones concernientes a los datos o elementos matemáticos sobre los que se va a operar, con el fin de que éstos representen lo que ocurriría "casi siempre". Tales restricciones se describen mediante distribuciones de probabilidad, que traducen y cuantifican la verosimilitud de que acontezcan ciertas situaciones. Las distribuciones utilizadas con mayor frecuencia son medidas gaussianas y, en particular, las denominadas medidas de Wiener.

Aunque se sabía desde los años sesenta que la integración múltiple es tratable en promedio, la demostración no era constructiva. En efecto, la demostración no especificaba los puntos optimales para la evaluación del integrando, ni el algoritmo combinatorio ideal, ni la complejidad computacional media.

Han fracasado los intentos de aplicar ideas procedentes de otros campos de las ciencias de cómputo con el fin de determinar estas incógnitas. Por ejemplo, la evaluación del integrando suele hacerse en puntos distribuidos regularmente, como los de una hoja de papel cuadriculado. Pero hay teoremas que indican que tales

La complejidad del caso promedio

Hemos mencionado en el texto que la complejidad de la integración múltiple en el método del caso promedio es del orden del recíproco del umbral de error (1/ε), y que en el problema de la reconstrucción de superficies es el cuadrado del recíproco ($1/\varepsilon^2$). Para mayor sencillez hemos prescindido de ciertos coeficientes multiplicadores que dependen de *d* y de ε. Vamos a dar aquí enunciados más rigurosos.

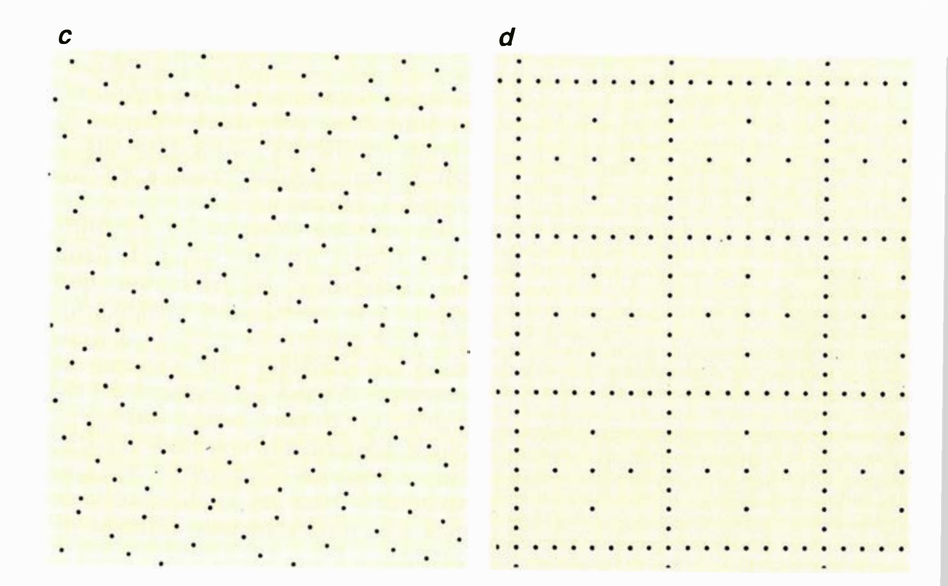
La complejidad computacional media, $\mathrm{comp}^{\mathrm{avg}}(\varepsilon, d; \mathrm{INT})$, de la integración múltiple está acotada por

$$\frac{g_1(d)}{\varepsilon}\left\{\log\frac{1}{\varepsilon}\right\}^{(d-1)/2} \leq \mathrm{copm}^{\mathrm{avg}}(\varepsilon, d; \mathrm{INT}) \leq \frac{g_2(d)}{\varepsilon}\left\{\log\frac{1}{\varepsilon}\right\}^{(d-1)/2}$$

La complejidad computacional media, $\mathrm{comp}^{\mathrm{avg}}(\varepsilon, d; \mathrm{SUR})$ de la reconstrucción de superficies está acotada por

$$\frac{g_3(d)}{\varepsilon^2}\left\{\log\frac{1}{\varepsilon}\right\}^{2(d-1)} \leq \mathrm{copm}^{\mathrm{avg}}(\varepsilon, d; \mathrm{SUR}) \leq \frac{g_4(d)}{\varepsilon^2}\left\{\log\frac{1}{\varepsilon}\right\}^{2(d-1)}$$

No se conocen por ahora buenas estimaciones de $g_1(d)$, $g_2(d)$, $g_3(d)$ y $g_4(d)$.



puntos no son los más idóneos para el tratamiento de caso promedio. Se dio una demostración en el año 1975, debida a N. Donald Ylvisaker, de la Universidad de California en Los Angeles. Posteriormente, en 1990, fue generalizada por Wasilkowski y Anargyros Papageorgiou, quien estaba por entonces preparando su tesis doctoral en la Universidad de Columbia.

La solución llegó en 1991, fecha en que Woźniakowski halló la construcción. Como no pocas veces ocurre en ciencia, el papel crucial lo desempeñó un resultado de una rama de las matemáticas, la teoría de números, muy alejada de la teoría de

La complejidad de cómputo en el caso discreto

Este artículo se ocupa de la intratabilidad de la integración múltiple y de la reconstrucción de superficies y de las formas de vencerla. Estudia, en ambos casos, problemas continuos. Pero, ¿qué se sabe acerca de la complejidad computacional cuando los problemas no son continuos, sino discretos? El célebre problema del viajante de comercio, que ha de visitar varias ciudades recorriendo la menor distancia posible, nos ofrece un ejemplo de problema discreto.

Un problema discreto es intratable cuando su complejidad computacional crece exponencialmente con el número de elementos a considerar. Ha sido conjeturada la intratabilidad de muchos problemas discretos en el caso determinístico más desfavorable, pero todavía no ha sido demostrada. Lo que sí se sabe es que hay centenares de problemas discretos que tienen todos la misma complejidad computacional. Lo cual significa que son todos tratables o todos intratables; la opinión más difundida entre los expertos es que todos son intratables. Por razones técnicas, tales problemas reciben la denominación de NP-completos. Una de las grandes cuestiones abiertas en teoría de complejidad computacional discreta es la de si los problemas NP-completos son verdaderamente intratables [*véase* "Máquinas de Turing," por John E. Hopcroft; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984].





5. EL REINGRESO en la atmósfera del transbordador espacial constituye un ejemplo de tarea computacionalmente compleja, a saber, la modelización del flujo aerodinámico en torno al aparato. Esa tarea es difícil, a pesar de que la dinámica del sistema depende sólo de siete variables. La adición de nuevas dimensiones puede generar problemas que jamás se conseguirá resolver, imponiendo con ello límites a lo científicamente cognoscible.

complejidad en el caso promedio. Parte de la clave fue debida a los trabajos en teoría de números de Klaus F. Roth, del Colegio Imperial de Londres, que recibió la Medalla Fields en 1958. Otra parte provino de investigaciones recientes de Wasilkowski.

Describamos el resultado con mayor precisión. Ante todo, pongamos a cero el parámetro de suavidad, esto es, afrontemos un problema insoluble en el caso más desfavorable del planteamiento determinístico. A continuación, supongamos que los integrandos se hallan distribuidos de acuerdo con una medida de Wiener. Prescindiendo por mor de sencillez de ciertos factores multiplicativos, se demuestra que la complejidad computacional es inversamente proporcional al umbral de error (o sea, del orden de $1/\varepsilon$). Para errores pequeños, el resultado constituye una ventaja sustancial sobre el método de Montecarlo clásico, en el cual el costo es inversamente proporcional al cuadrado del error umbral ($1/\varepsilon^2$).

El planteamiento de caso promedio ofrece una certidumbre de distinto tipo que la proporcionada por el método de aleatorización (Montecarlo). En efecto, el error del método de caso promedio depende de la distribución de los integrandos, mientras que el error en el método estocástico depende de una distribución de los puntos muestrales. En nuestra analogía con un estante de libros, la distribución en el método del caso promedio podría descartar la inclusión de muchos libros de tamaño excesivo (los tomos de la historia del arte), mientras que la distribución en el método aleatorio determina qué libros hay que tomar para la muestra.

En el método de caso promedio los puntos óptimos de evaluación han de ser elegidos determinísticamente. Los mejores puntos corresponden a puntos de Hammersley o a puntos de cruzamiento hiperbólico. Estos puntos determinísticos ofrecen un muestreo superior al de los puntos elegidos al azar o al de puntos equidistribuidos (de un retículo). Convierten en tratable por término medio lo que sería imposible de resolver.

¿Es también tratable en promedio la reconstrucción de superficies? Esta pregunta reviste particular importancia porque el método de aleatorización de nada sirve, como ya se ha mencionado. En las mismas hipótesis supuestas para la integración, tenemos que la dificultad computacional es del orden de $1/\varepsilon^2$. Por consiguiente, la reconstrucción de superficies se vuelve tratable en promedio. Como ocurría en la integración, los puntos de cruce hiperbólico son optimales.

Estamos examinando ahora si el método del caso promedio constituye una alternativa práctica. Spassimir H. Paskov, un doctorando de la Universidad de Columbia, está preparando programas destinados a comparar las técnicas determinísticas de integración con los métodos de Montecarlo correspondientes. Los resultados preliminares obtenidos ensayando ciertos problemas financieros sugieren la superioridad práctica de los métodos determinísticos.

En nuestra descripción simplificada hemos querido dejar de lado un coeficiente multiplicador que afecta a la complejidad computacional. Este coeficiente depende del número de variables que presente el problema. Cuando el número de variables es grande, dicho coeficiente puede adquirir una magnitud enorme. No se conocen estimaciones teóricas apropiadas para tal coeficiente y se cree que resultarán muy difíciles de obtener.

Woźniakowski desveló una solución: desembarazarse de tal coeficiente. Específicamente, decimos que un problema es tratable en sentido fuerte si el número de evaluaciones funcionales que exige la solución no depende en absoluto del número de variables. Antes bien, dependería tan sólo de una potencia de $1/\varepsilon$. Parece que tal posibilidad es esperar demasiado, pero el año pasado se demostró que la integración múltiple y la reconstrucción de superficies son ambas fuertemente tratables en promedio.

Será preciso vencer un último obstáculo para hacer aprovechables estos nuevos resultados. Sabemos que han de existir puntos de evaluación y un algoritmo combinatorio capaces de lograr que la integración y la reconstrucción de superficies sean fuertemente tratables en promedio. Para nuestra desgracia, la demostración de este resultado no nos dice qué puntos son ni cuáles los algoritmos, lo que nos deja pendiente para el futuro un hermoso problema.

Las investigaciones en complejidad basada en información han llevado a uno de nosotros (Traub) a especular que pudiera resultar posible dar una demostración formal de que ciertas cuestiones científicas son imposibles de responder. La línea de ataque propuesta consiste en demostrar que no existen en el universo los recursos de cómputo (tiempo, memoria y energía) necesarios para resolver tales cuestiones.

Una de las grandes conquistas matemáticas de los últimos sesenta años ha sido la idea de que hay problemas matemáticos indecidibles, problemas no computables y problemas inabordables. El filósofo Kurt Gödel demostró el primero de estos tres resultados. Gödel estableció que, en

todo sistema matemático suficientemente rico, como la aritmética, existen teoremas que jamás podrán ser demostrados.

Estamos convencidos de que ya es hora de subir las apuestas y tratar de demostrar que hay cuestiones científicas imposibles de responder. Dicho con otras palabras, nos gustaría establecer un teorema de Gödel para la física. Tal proceso supone un desafío que difiere considerablemente de las demostraciones de resultados sobre problemas matemáticos, porque las cuestiones científicas no van dotadas de formulación matemática. Citemos, a modo de botón de muestra, el problema de cuándo dejará de expandirse el universo o cuál será la temperatura media del globo terráqueo en el año 2001.

¿Por qué inducen los resultados sobre intratabilidad a pensar que ciertas cuestiones científicas pudieran ser irresolubles? Recordemos los resultados. En el planteamiento determinístico de caso más desfavorable la complejidad computacional de muchos problemas continuos crece exponencialmente con la dimensión. Se conjetura, asimismo, que la complejidad computacional de muchos problemas discretos también crece exponencialmente con el número de datos ingresados. Además, aunque algunos problemas son tratables al ser aleatorizados o estudiados en promedio, se ha demostrado que otros siguen siendo inabordables. Tales problemas pueden permanecer agazapados en ciertas tareas de supercomputación o en cuestiones relativas a los fundamentos de la física. Después de todo, entrañan grandes números de variables o partículas. Peor todavía, muchos problemas físicos exigen calcular integrales de un tipo especial, llamadas integrales curvilíneas, problemas que poseen un número infinito de dimensiones. El cómputo de integrales curvilíneas invita a aproximaciones de dimensión alta. En consecuencia, los resultados y conjeturas sobre intratabilidad resultan sin duda fascinantes, pues sugieren que muchas tareas en las que el número de variables o de objetos es muy grande resultarán de imposible resolución.

Hacemos hincapié en la posibilidad de otros impedimentos para la resolución de las cuestiones científicas. Uno es el caos, la sensibilidad extrema a las condiciones iniciales. Dado que las condiciones iniciales o bien no son exactamente conocidas o bien no pueden ser exactamente introducidas en un ordenador digital, ciertas cuestiones concernientes al comportamiento de un sistema caótico no admiten respuesta. Para mejor centrarnos en la cuestión que nos ocupa, nos limitaremos a la intratabilidad.

Como ya hemos comentado, las cuestiones científicas no vienen acompañadas de formulación matemática. Por tanto, cada uno de los múltiples modelos matemáticos distintos pudiera captar la esencia de una misma cuestión científica. Dado que los resultados de intratabilidad se refieren a una formulación matemática particular, cabría que, aun cuando una determinada formulación matemática fuese intratable, se hallara una formulación distinta que sí fuese abordable. Esta perspectiva indica una posible vía para demostrar que existen cuestiones científicas irresolubles. Podemos intentar demostrar la existencia de cuestiones científicas tales que toda formulación matemática que capte la esencia de la cuestión habrá de ser intratable. El consiguiente resultado constituiría una versión del teorema de Gödel en ciencia.

A los humanos no sólo les intriga lo desconocido, sino también lo incognoscible. Hemos sugerido aquí una posible vía para establecer lo que puede ser eternamente incognoscible en ciencia. La maldición dimensional, deshecha ahora para tantas clases de problemas, puede todavía arrojar su maleficio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INFORMATION-BASED COMPLEXITY. E. W. Packel y J. F. Traub, en *Nature*, volumen 328, número 6125, páginas 29-33; 2 de julio de 1987.

INFORMATION-BASED COMPLEXITY. J. F. Traub, G. W. Wasilkowski y H. Woźniakowski. Academic Press; San Diego, California, 1988.

AVERAGE CASE COMPLEXITY OF MULTIVARIATE INTEGRATION. H. Woźniakowski en *Bulletin of the American Mathematical Society*, volumen 24, número 1, páginas 185-194; enero de 1991.

THE COMPUTATIONAL COMPLEXITY OF DIFFERENTIAL AND INTEGRAL EQUATIONS: AN INFORMATION-BASED APPROACH. Arthur G. Werschulz. Oxford University Press, 1991.

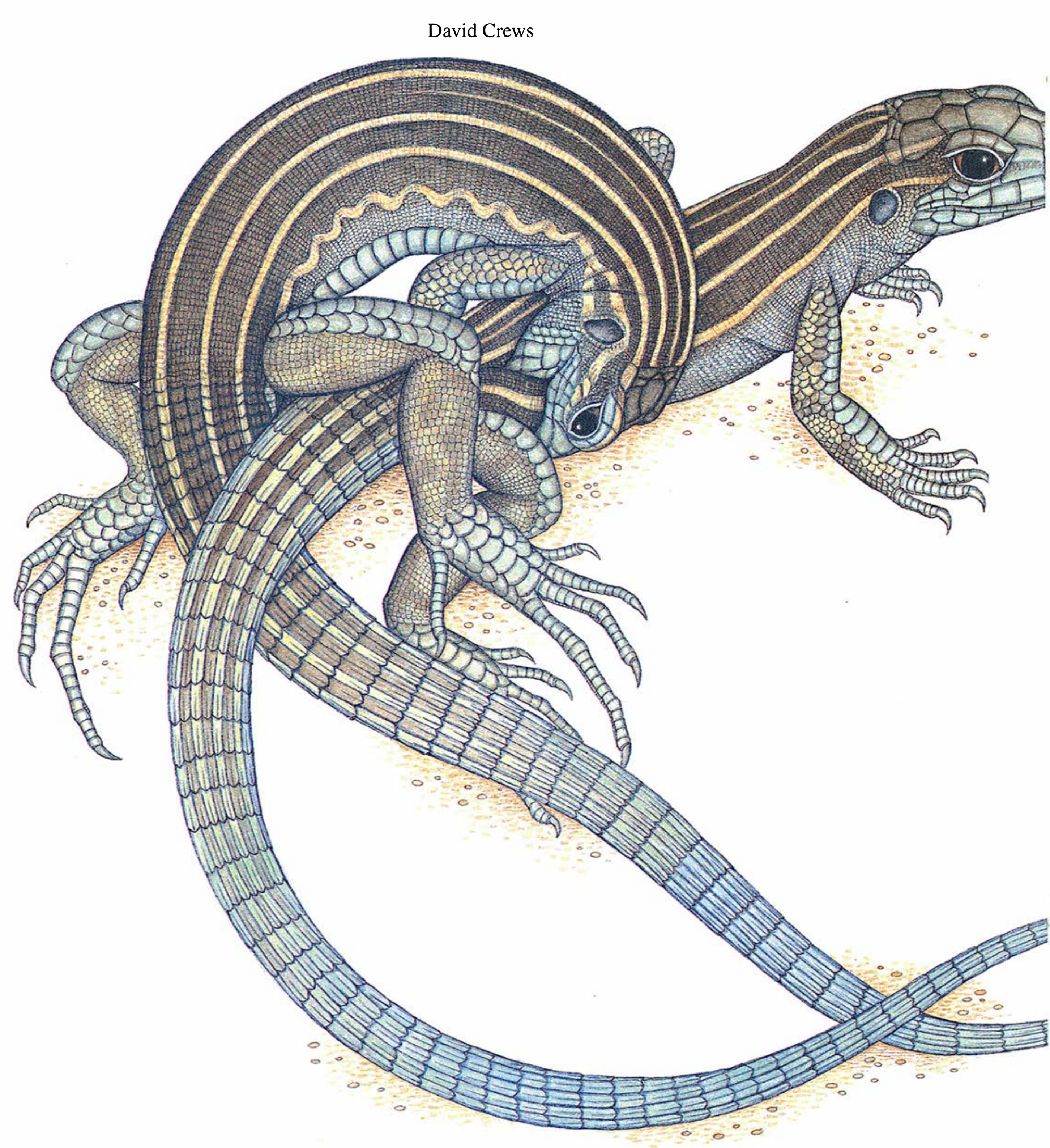
THEORY AND APPLICATIONS OF INFORMATION-BASED COMPLEXITY. J. F. Traub y H. Woźniakowski en *1990 Lectures in Complex Systems, Santa Fe Institute*. Dirigido por Lynn Nadel y Daniel L. Stein. Addison-Wesley, 1991.

WHAT IS SCIENTIFICALLY KNOWABLE? J. F. Traub en *Carnegie Mellon University Computer Science: a 25th Anniversary Commemorative*. Dirigido por Richard F. Rashid. Addison-Wesley, 1991.

Sexualidad animal

Los animales han desarrollado toda una gama de mecanismos para decidir si un individuo adquiere rasgos masculinos o femeninos. Las comparaciones entre especies ofrecen claves sorprendentes sobre la naturaleza de la sexualidad

David Crews



Una de las características fundamentales de la vida es la sexualidad, la división en machos y hembras. Consideraciones sexuales influyen en la apariencia, la forma, el comportamiento y la constitución química de casi todos los organismos pluricelulares. Pero, aunque resulte sorprendente, no sabemos por qué existe el sexo. En los últimos años, sin embargo, ha ido apareciendo abundante información sobre los componentes multifacéticos de la sexualidad; y revelan que muchos aspectos familiares son menos universales de lo que antaño se suponía. De la investigación emerge una nueva manera de entender las relaciones entre machos y hembras, y un atisbo sobre la forma en que evolucionó el sexo.

Entre los vertebrados, la sexualidad se expresa de formas diversas. Machos y hembras manifiestan peculiaridades muy distintas de orden químico, anatómico y conductual. Por lo que concierne al comportamiento, la divergencia obvia se evidencia en la actividad copuladora. En general, los individuos dotados de testículos intentan la inseminación (comportamiento masculino típico), mientras que los provistos de ovarios son receptivos a la inseminación (comportamiento femenino típico). Machos y hembras suelen diferir en otros aspectos menos patentes: grado de actividad, regulación del peso corporal, nivel de agresión y pautas de aprendizaje. Algunas acciones específicas del género se hallan asociadas a diferencias sistemáticas en determinadas zonas del cerebro, aunque no necesariamente causadas por éstas.

A lo largo de los últimos cuarenta años, los biólogos han perfilado un esbozo general de la naturaleza de la sexualidad. Me refiero al "esquema organizativo" ("organizational concept"). Aunque no es absolutamente general, esa idea explica, a grandes trazos, la estructura de la sexualidad en los humanos y otros mamíferos. Varios de mis colegas y yo mismo estamos investigando cómo generalizar el modelo para que abarque a todos los vertebrados.

Según el esquema o modelo organizativo, el sexo de un animal (la naturaleza de sus gónadas) queda determinado en el momento de la concepción por la constitución cromosómica heredada de sus progenitores. Las gónadas producen hormonas sexuales esteroides, que circulan durante los primeros estadios del desarrollo embrionario y esculpen las características masculinas o femeninas del individuo. Los rasgos sexuales masculinos son inducidos sobre todo por los andrógenos, una clase de hormonas (a la que pertenece la testosterona) sintetizada en los testículos. Los individuos carentes de testículos desarrollan ovarios, que generan principalmente estrógenos y progestinas, hormonas femeninas. En este cuadro, el femenino es el sexo neutro, o defectivo, mientras que el masculino es el sexo organizado.

Un elemento clave del esquema organizativo es el papel central desempeñado por las hormonas sexuales. La apreciación de la influencia de dichas hormonas en la diferenciación sexual se debe a Frank R. Lillie, de la Universidad de Chicago. A principios de siglo, Lillie observó que, cuando las vacas parían gemelos de sexos opuestos, el femenino era estéril y tenía rasgos masculinizados; su formación de embriólogo le llevó a sugerir que las hormonas androgénicas secretadas por el gemelo masculino en el útero materno imbuían en el gemelo femenino algunos rasgos masculinos. Desde entonces, se ha corroborado la conjetura de Lillie según la cual las gónadas embrionarias segregan las hormonas que hacen distintos a machos y hembras.

En los mamíferos, los embriones comienzan con una masa de tejido sexual primordial. El que ese tejido se transforme en gónadas masculinas o femeninas depende de la activación de ciertas señales genéticas. Luego, los activadores hormonales que actúan en el embrión controlarán el sexo de los genitales. Los testículos de los machos genéticos producen concentraciones importantes de andrógenos, que inducen la formación de conductos deferentes, pene y escroto. En ausencia de andrógenos, el embrión adquiere órganos sexuales femeninos: útero, clítoris y labios vaginales.

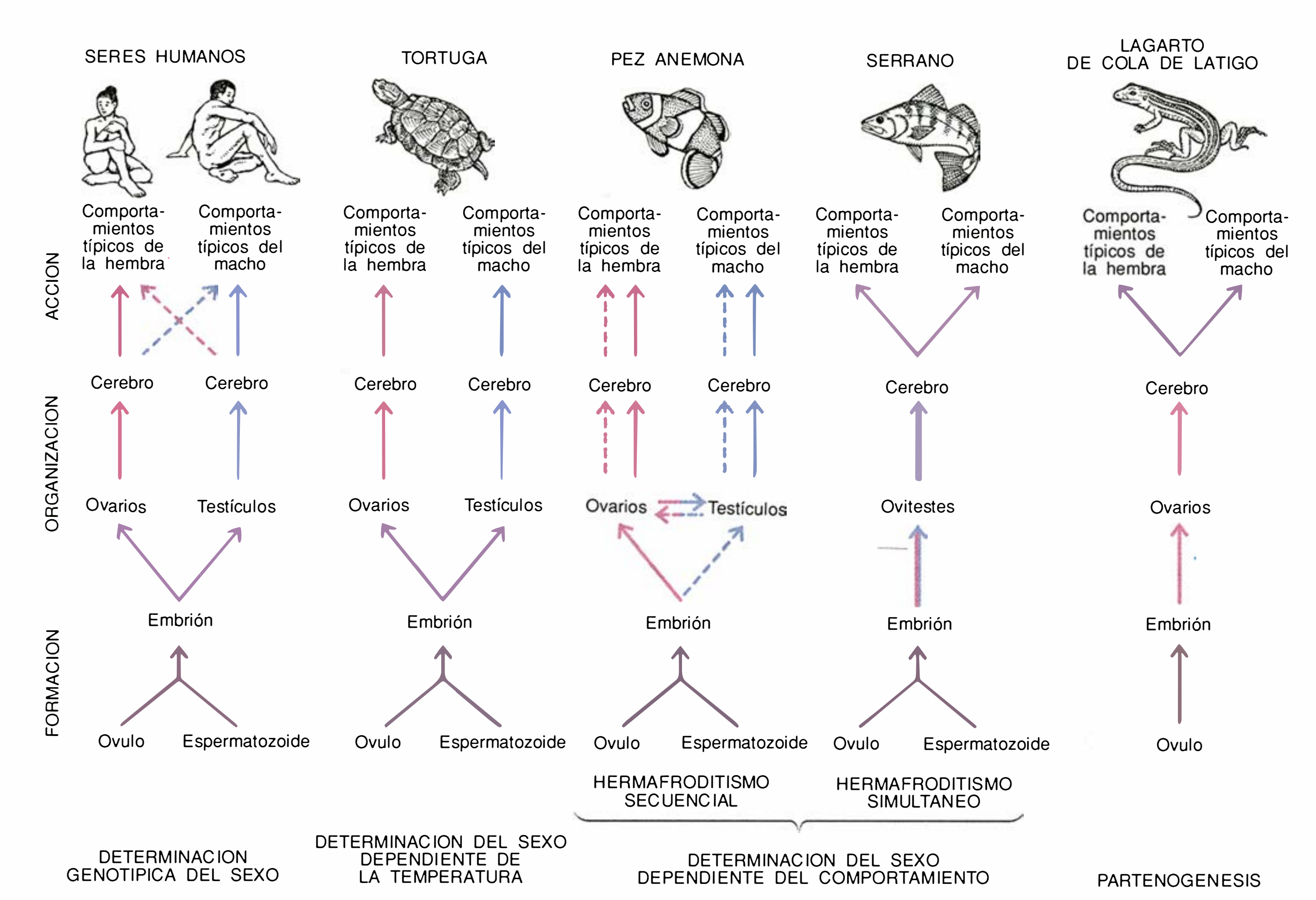
Pruebas cada vez más numerosas obtenidas en la experimentación animal abonan la idea según la cual muchos componentes de la sexualidad adulta (y no sólo la estructura de los órganos sexuales) dependen del entorno hormonal durante el desarrollo fetal. Algunos de los apoyos más sólidos proceden de estudios realizados en especies que producen camadas de muchas crías en cada preñez. Durante tales embarazos, los fetos se disponen en el interior del útero como los guisantes en su vaina, agrupamiento que hace que los fetos masculinos y femeninos se encuentren juntos en un orden aleatorio.

En un entorno así, las hormonas esteroides producidas por las gónadas de un feto podrían influir en las estructuras neurales y sexuales secundarias y accesorias en desarrollo del feto adyacente. Y en efecto, Lynwood G. Clemens, de la Universidad estatal de Michigan, descubrió que el entorno hormonal creado por los fetos vecinos puede condicionar la sexualidad de las ratas adultas. Mertice Clark y Bennett G. Galef, de la Universidad McMaster, han observado hace poco un efecto similar entre los gerbillos.

Frederick S. vom Saal, de la Universidad de Missouri, y autor de un estudio exhaustivo sobre el desarrollo sexual en los ratones, ha descubierto que las hembras de ratón que se desarrollan entre dos fetos machos ("hembras 2M"), comparadas con los fetos femeninos que no se desarrollan cerca de un macho ("hembras 0M"), se hallan expuestas a concentraciones superiores de testosterona e inferiores de estrógeno. Después del nacimiento, las hembras 2M revelan una anatomía más masculinizada que las 0M, tardan más en llegar a la pubertad y, alcanzada la madurez, tienen ciclos reproductores más cortos y menos numerosos; asimismo, las 2M son menos atractivas y sexualmente menos estimulan-

1. LAGARTOS DE COLA DE LATIGO, enzarzados en un complicado ritual de apareamiento. Ocurre así, aun cuando algunas especies de estos saurios están compuestas sólo por hembras que se autorreproducen. El comportamiento sexual parece ser un rasgo profundamente arraigado que cumple otras funciones biológicas además de la fecundación; por ejemplo, la cubrición hace que los lagartos de cola de látigo asexuales pongan más huevos.

DAVID CREWS ha pasado largos años explorando las raíces evolutivas de la sexualidad y el papel de las hormonas en el control de la diferenciación y el comportamiento sexuales. Se doctoró en biología por la Universidad de Rutgers en 1973. En 1982 se trasladó a la Universidad de Texas en Austin, donde enseña zoología. Su investigación se ha centrado en la sexualidad de las serpientes de jarretera, los lagartos de cola de látigo y, más recientemente, las tortugas gicoteas y los gecos leopardo. Ha fundado una empresa de biotecnología que emplea un proceso patentado de determinación del sexo inducido por hormonas en la cría de avestruces, emúes y otras aves raras.



2. DIFERENCIACION SEXUAL, común en todas las especies de vertebrados si bien a través de mecanismos muy diferentes. En los mamíferos, los cromosomas heredados en el momento de la fecundación dictan si un individuo desarrollará órganos sexuales masculinos o femeninos. En muchos reptiles, la temperatura de incubación del embrión controla el sexo de un individuo. Los animales hermafroditas pasan de un comportamiento reproductor masculino a otro femenino, por lo general en respuesta al entorno social del individuo. Los hermafroditas simultáneos pueden alternar de sexo repetidamente. Los hermafroditas secuenciales cambian una sola vez de macho a hembra, o viceversa. Las especies partenogenéticas exhiben también un comportamiento sexual típico de macho y de hembra.

tes para los machos, además de mostrar una mayor agresividad contra otras hembras.

La hiena manchada, un carnívoro nocturno africano, ofrece otro ejemplo excelente del encauzamiento de la sexualidad adulta por las hormonas fetales. Las hembras exhiben muchas características normalmente asociadas con los machos de mamíferos. Dentro de un clan, o grupo social, las hembras adultas son mayores que los machos y pesan más; dominan a casi todos los machos adultos en las peleas y en el acceso al alimento. Las hembras tienen ovarios y genitales internos de aspecto normal, pero la morfología de sus genitales externos es masculinizada. Carecen de vagina externa y sus labios están fusionados, formando un saco escrotal completo con dos prominentes almohadillas de grasa que simulan los testículos. El clítoris de una hembra de hiena manchada, grande y eréctil, se parece mucho al pene de un macho. Al igual que hacen muchos machos de otras especies, las hembras de hiena manchada emplean su clítoris en exhibiciones de saludo y en interacciones de dominancia.

Stephen E. Glickman y Laurence G. Frank, de la Universidad de California en Berkeley, atribuyen esa masculinización del útero a los elevados niveles de androstenodiona en el torrente sanguíneo de la madre. La androstenodiona es un compuesto químico inactivo que puede convertirse en estrógeno o en testosterona. En la placenta de una hiena preñada, se transforma en estrógeno una cantidad exigua de esa sustancia, con el consiguiente aumento del nivel de testosterona en el feto. Suponen, pues, que la abundancia de testosterona produce los rasgos masculinizados de las hembras.

Debe existir, sin duda, algún mecanismo que explique la influencia del entorno hormonal embrionario en el comportamiento sexual adulto del animal. En 1959, Charles H. Phoenix, Robert W. Goy, Arnold A. Gerall y William C. Young, de la Universidad de Kansas, propusieron que las hormonas esteroides secretadas en los embriones de mamíferos ayudan a organizar la sexualidad del cerebro. La investigación posterior ha demostrado que, en los vertebrados, las hormonas esteroides actúan directamente sobre neuronas específicas, interconectadas en circuitos. Estos circuitos neuronales parecen proporcionar el estímulo que genera las diferencias de comportamiento entre machos y hembras.

Varios descubrimientos recientes han aclarado en buena medida cuál es la conexión entre hormonas, estructura cerebral y comportamiento sexual. Así, el grupo de Pauline I. Yahr, de la Universidad de California en Irvine, identificó en el cerebro del gerbillo un núcleo que sólo poseen los machos; se trata de un núcleo incluido en un área que ayuda a controlar el comportamiento copulatorio de los machos. Las hembras de esta especie a las que se inyecta andró-

genos en las etapas iniciales de la vida desarrollan este núcleo "masculino" y adoptan algunas características de comportamiento típico del macho.

Ciertas especies de paseriformes manifiestan también estructuras cerebrales influidas por hormonas, que parecen corresponder a los papeles sexuales en el cortejo. Los canarios macho comienzan a cantar en primavera, cuando sus niveles de andrógenos son elevados. Mediante el canto establecen territorios de cría, a la vez que atraen a las hembras. Estas responden al canto, pero no cantan. Fernando Nottebohm, de la Universidad Rockefeller, y otros han determinado que el comportamiento complementario de machos y hembras de canarios y de otros pájaros canores va acompañado de diferencias en la estructura de sus cerebros.

Han descubierto que el canto depende de una serie interconectada de núcleos cerebrales que controlan los órganos vocales. Las zonas cerebrales de control del canto suelen ser mucho menores en las hembras que en los machos, y son las hormonas esteroides las que determinan en los embriones de paseriformes qué neuronas van a sobrevivir y cuáles morirán. Como consecuencia, el tamaño y el número de las neuronas presentes en los núcleos que controlan el canto, así como la cantidad de sinapsis, superan en los machos los de las hembras.

Nottebohm ha demostrado que el tamaño de los núcleos cerebrales que controlan el canto varía con las estaciones, creciendo y decreciendo en sintonía con el flujo del ciclo reproductor. Con su grupo, ha recreado artificialmente dichos cambios estacionales del canto en machos de estas especies canoras mediante la castración (para reducir sus niveles de andrógenos) o la inyección de andrógeno (para aumentar estos niveles). En experimentos relacionados, se ha inducido el canto en hembras de canarios a las que se inyectó la cantidad apropiada de andrógeno.

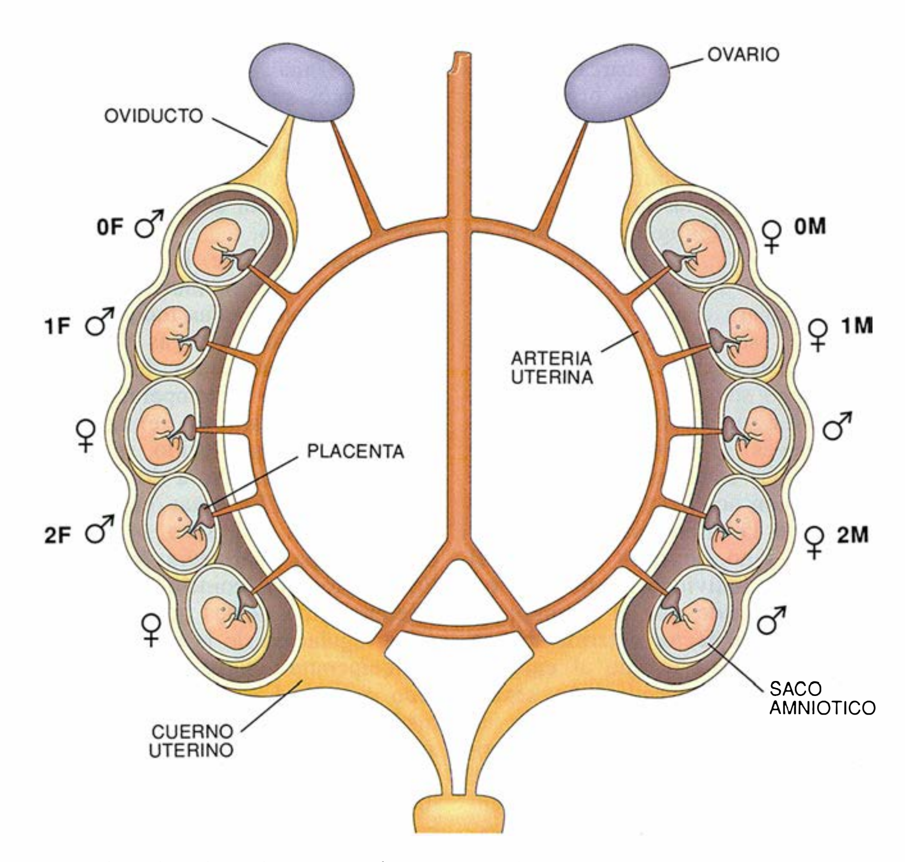
Un descubrimiento particularmente estimulante y controvertido de la relación entre un comportamiento sexual y una estructura del cerebro concierne a la homosexualidad en los seres humanos. Simon LeVay, del Instituto Salk para Estudios Biológicos en San Diego, ha señalado que el tamaño de un núcleo hipotalámico anterior de varones homosexuales se parece mucho más a la estructura correspondiente de las mujeres que a la de varones heterosexuales. El equipo de Dean H. Hamer, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, afirma haber encontrado en el cromosoma X una región que podría contener uno o varios genes de la homosexualidad. Si así fuera, la estructura cerebral asociada estaría bajo control genético directo. También es posible, sin embargo, que el entorno hormonal que rodea al feto controle parcial o totalmente el desarrollo del núcleo cerebral.

Estos descubrimientos ilustran cuán insuficiente es la división estereotipada en macho o hembra. Como deja bien claro el esquema organizativo, la sexualidad depende de controles hormonales sutiles, no sólo de un etiquetaje genético que separa tajantemente machos y hembras. Y este hallazgo se aplica a todos los tejidos asociados con la reproducción, entre los que se cuentan los circuitos cerebrales que subyacen al comportamiento sexual.

En la mayoría de los vertebrados, los adultos exhiben comportamientos sexuales homotípicos, es decir, característicos de su propio sexo gonadal. Pero no es infrecuente que realicen pautas de comportamiento normalmente asociadas con el sexo opuesto: comportamientos heterotípicos; a modo de ejemplo, las hembras se dedican a la cubrición, en tanto que los machos solicitan ser cubiertos.

Estos comportamientos sexuales heterotípicos son una parte frecuente e importante de la biología social de muchas especies, en especial entre los mamíferos. Las vacas suelen cubrir a otras hembras, práctica que parece ayudar a sincronizar los ciclos reproductores del rebaño. En los macacos búnder, la cubrición constituye un indicador de dominancia, para mantener una jerarquía social ordenada. Aunque las hormonas embrionarias dirigen el desarrollo neuronal, parece que el cerebro nunca pierde por completo la circuitería doble que permite un comportamiento sexual tanto homotípico como heterotípico.

Hasta aquí, el esquema o modelo organizativo parece ofrecer un marco cabal para comprender la sexualidad. Se corre el riesgo, no obstante, de generalizar sobre su naturaleza basándose en observaciones de un número muy pequeño de especies, todas ellas vertebrados de sangre caliente, como aves y mamíferos. Para evaluar



3. ENTORNO HORMONAL del útero y su influencia en la sexualidad adulta de ratones, gerbillos y ratas. Los embriones femeninos rodeados a ambos lados por machos (hembras 2M) se hallan expuestos a niveles más elevados de testosterona que los que no se desarrollan junto a un macho (hembras 0M). Las hembras 2M maduras poseen una anatomía masculinizada; también son más agresivas y menos atractivas para los machos que las hembras 0M. El efecto feminizador opuesto se observa en los machos rodeados por hembras (machos 2F).

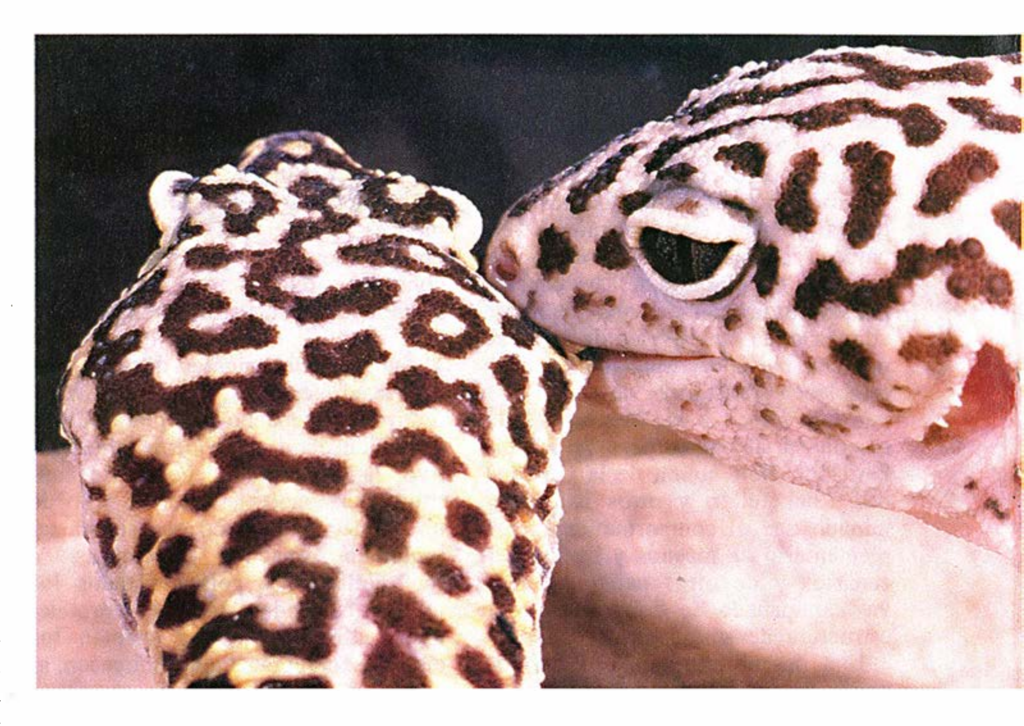
las conclusiones resultantes sobre la sexualidad animal, hay que considerar una gama mucho más extensa de especies de vertebrados. Gran parte de mi propia investigación se ha centrado en determinar en qué medida el esquema organizativo es aplicable a los reptiles y los peces, vertebrados de sangre fría.

Esa línea de investigación es decisiva para elaborar una imagen más completa de la sexualidad animal. Los tipos de maduración y comportamiento sexual que se encuentran en un tipo determinado de mamífero o de ave reflejan tal vez las adaptaciones únicas de aquella especie. Los rasgos sexuales que comparten muchas clases diferentes de vertebrados, en cambio, datan presumiblemente de un estadio evolutivo más antiguo. Del mismo modo, los comportamientos sexuales (pensemos en la cubrición) que aparecen tanto en machos como en hembras pueden preceder a actividades de apareamiento específicas del sexo, más familiares. Sólo conociendo las raíces evolutivas de la sexualidad podremos desentrañar las reglas que gobiernan este proceso vital omnipresente.

Cuando se contempla desde una perspectiva que abarca todos los vertebrados, el modelo organizativo fracasa de plano. Yo veo sólo un componente verdaderamente esencial de la sexualidad animal: los efectos organizativos de las hormonas sexuales en los tejidos que intervienen en la reproducción. Ahora bien, el mecanismo que dirige estos efectos varía de manera considerable.

En el esquema organizativo, los cromosomas sexuales ejercen el control último sobre el sexo que se impondrá en un individuo. Pero muchos peces y reptiles carecen de cromosomas sexuales. Estas especies cuentan con activadores no genéticos que guían la diferenciación sexual.

En el seno de tales especies, el sexo de un individuo acostumbra venir condicionado por el entorno; en unos casos, el factor determinante es la temperatura a la que el embrión se desarrolla (determinación sexual dependiente de la temperatura); en otros casos, se trata del entorno social del adulto (determinación del sexo dependiente del comportamiento). Algunas especies animales prescinden incluso de la diferenciación sexual y se reproducen por partenogénesis, un proceso asexual. Estos métodos no genéticos de diferenciación sexual pueden ser precursores evolutivos del control cromosómico utilizado en los mamíferos.



La determinación del sexo dependiente de la temperatura se identificó hace más de 25 años, cuando Madeline Charnier, de la Universidad de Dakar, observó que la temperatura a la que eran incubados los huevos del lagarto arco iris gobernaba su proporción sexual. En las postrimerías de los años setenta, James J. Bull y Richard Vogt, de la Universidad de Wisconsin, demostraron que la temperatura activa algún mecanismo, desconocido hasta ahora, de determinación del sexo.

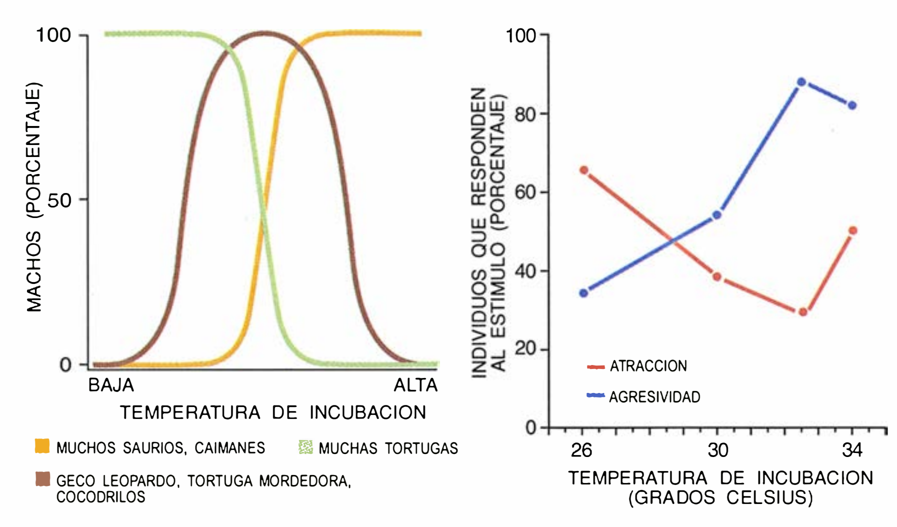
Sabemos ya que la temperatura controla el sexo en muchas especies de reptiles, entre ellas todos los cocodilios, muchas tortugas y algunos saurios. Aunque todos los reptiles dependientes de la temperatura carecen de cromosomas sexuales, su sexo, una vez establecido, se mantiene sin modificación a lo largo de toda su vida. En estas especies, la determinación del sexo se produce en una etapa intermedia del desarrollo embrionario, coincidiendo con la diferenciación de las gónadas.

La regulación de la sexualidad por la temperatura sigue un patrón del todo o nada. Las temperaturas intermedias no producen hermafroditas; antes bien, dan lugar a una proporción sexual más equilibrada. Esto indica que la temperatura activa un conmutador biológico que determina el sexo gonadal. Bull, Judith M. Bergeron, de la Universidad de Texas en Austin, Thane Wibbels, de la Universidad de Alabama en Birmingham, y yo mismo hemos estudiado este fenómeno, y hemos observado que la temperatura actúa modificando la distribución de enzimas y de receptores hormonales, entre ellos los de estrógeno y andrógeno, en el embrión en crecimiento.

En el geco leopardo, temperaturas de incubación bajas y altas producen hembras, mientras que temperaturas intermedias dan machos (en otras especies predominan pautas diferentes). Cuando trabajaba con Bull y William H. N. Gutzke, de la Universidad estatal de Memphis, administré estrógeno a huevos de geco en las etapas iniciales del desarrollo. El estrógeno anuló el efecto determinante del nacimiento de machos ejercido por la temperatura, de manera que todas las crías salieron con ovarios.

A temperaturas cercanas a las que producen hembras, bastan dosis inferiores de estrógeno para inducir la formación de ovarios. Bergeron, Wibbels y yo mismo hemos comprobado que las sustancias químicas que inhiben la producción de estrógeno y andrógeno pueden impedir el desarrollo de las gónadas masculinas o femeninas habituales según el control ejercido por la temperatura. Las hormonas sexuales actúan, tal parece, como el equivalente fisiológico de las temperaturas de incubación en las especies cuyo destino sexual viene determinado por la temperatura.

La temperatura a la que se incuban los huevos de geco leopardo deja una huella permanente en la sexualidad adulta. Con Alan Tousignant observé que las hembras nacidas de huevos incubados a temperaturas relativamente frías maduran antes que las que se desarrollan a las tempera-



4. LA TEMPERATURA DE INCUBACION de los embriones determina la proporción sexual en muchos tipos de reptiles. Según las especies, los embriones se desarrollan predominantemente en machos a temperaturas bajas, intermedias o altas (*arriba, izquierda*). Entre las hembras de geco leopardo, temperaturas de incubación más elevadas (hasta 32,5 grados Celsius) suscitan un aumento de la agresividad y menguan la intensidad de la atracción ejercida sobre los machos (*arriba, derecha*). La fotografía muestra el cortejo normal en los gecos leopardo.

turas más cálidas, inductoras, predominantemente, de machos. Deborah Flores, becaria de mi departamento como el anterior, comprobó que las hembras de geco mantenidas a temperaturas de incubación que predisponen a la aparición de machos son menos atractivas para éstos que las incubadas a las temperaturas que predisponen a hembras.

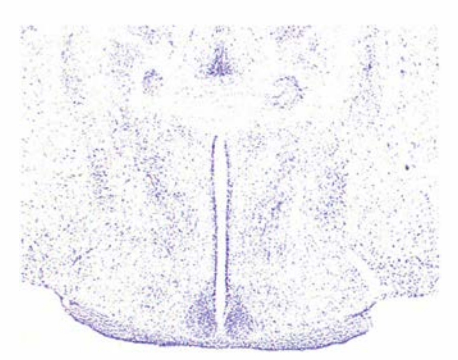
Los gecos leopardo, machos y hembras, son más agresivos si experimentan temperaturas elevadas durante la incubación y más dóciles cuando sufrieron temperaturas bajas. Además, las hembras incubadas a temperaturas propicias para el nacimiento de machos desarrollan glándulas púbicas con poros abiertos, similares a los encontrados en los machos; las desarrolladas a las temperaturas propicias para el nacimiento de hembras presentan glándulas menores y poros cerrados. En general, las concentraciones de andrógenos en circulación son inferiores en las hembras adultas que en los machos adultos. Pero en las hembras incubadas a temperaturas que disponen a la aparición de machos los niveles de esta hormona son superiores, y los de estrógeno inferiores, que los correspondientes en las hembras desarrolladas a temperaturas que promueven el sexo femenino. Según parece, el comportamiento y la química sexual del adulto reflejan un entorno hormonal modulado por la temperatura en las primeras etapas del desarrollo del individuo.

La determinación sexual en función de la temperatura es quizás un precursor evolutivo del control genético presente en los mamíferos. Si realmente es así, podrían sobrevivir reliquias de comportamiento sensible a la temperatura en algunos vertebrados superiores. Evelyn Satinoff, de la Universidad de Illinois, y Christiana L. Williams, de la Escuela Universitaria Hunter, entre otros, señalan que la modificación de la temperatura condiciona el comportamiento de las crías de rata. Eso supone que, hasta en los mamíferos, los cambios de temperatura pueden modular los efectos organizativos de las hormonas esteroides. Quizá las temperaturas corporales, bastante constantes, de los animales de sangre caliente enmascaren un mecanismo superviviente por medio del cual la temperatura interviene en la diferenciación sexual del feto.

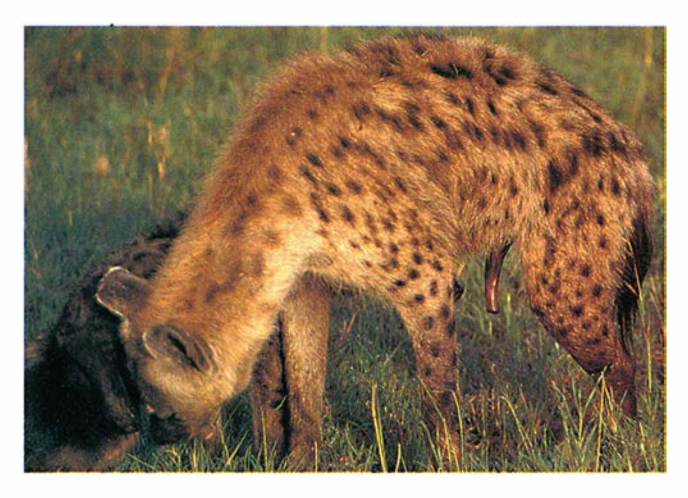
En las especies dependientes de la temperatura, el sexo permanece estable una vez asentado. Pero las especies que experimentan determinación sexual en función del comportamiento, la otra forma principal de control no genético del sexo, se apartan todavía más del modelo organizativo y del sexo establecido por los cromosomas. En la mayoría de los casos, estos animales son hermafroditas, es decir, individuos que poseen a la vez gónadas masculinas y femeninas. El entorno social controla si un individuo adopta un papel reproductor masculino o femenino; en otras palabras, los estímulos sensoriales, y no los cromosomas, dirigen la diferenciación sexual. Lo cual no empece que las especies hermafroditas compartan muchas características químicas y de comportamiento con los vertebrados de sangre caliente.

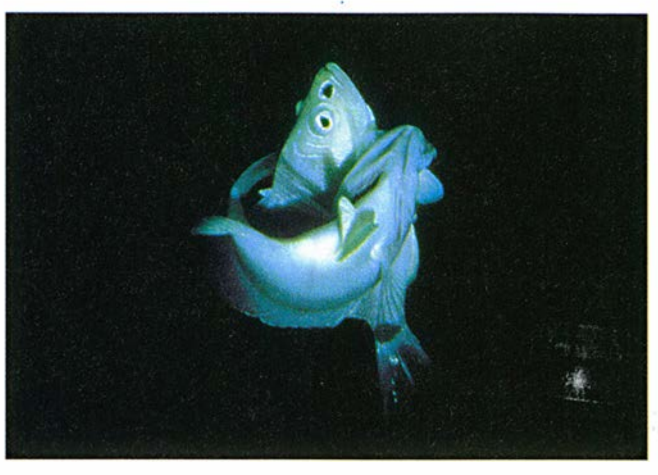
Algunas especies de peces dependientes del comportamiento son hermafroditas secuenciales; pasan, pues, de un sexo al otro durante su vida, pero en un momento determinado expresan sólo un sexo gonadal. Los peces payaso de color naranja y blanco nacen machos y se transforman posteriormente en hembras. Ciertos peces de arrecifes coralinos del océano Pacífico y del mar Caribe siguen el recorrido inverso, empiezan siendo hembras y terminan en machos. El momento preciso del cambio de sexo depende de un activador social, verbigracia, la desaparición de un macho o una hembra dominantes.

Otras especies de peces son hermafroditas simultáneos: la gónada contiene a la vez tejido ovárico y testicular. Curiosamente, los individuos de estas especies casi nunca fecundan sus propios óvulos. En cambio, conti-




5. ESTRUCTURA DEL CEREBRO, relacionada con el comportamiento sexual en muchas especies. Estas imágenes muestran diferencias neurales en la región preóptica del cerebro de una hembra (*izquierda*) y de un macho (*derecha*) de gerbillos. Se trata de una zona implicada en el control del comportamiento copulador y de deposición de marcas olorosas del macho, comportamientos influidos por hormonas andrógenas. Las hembras a las que se suministra andrógenos en etapas preoces de su vida desarrollan estructuras cerebrales masculinas.





6. EL COMPORTAMIENTO SEXUAL no siempre se divide netamente en categorías masculina y femenina. Las hembras de hiena manchada, como la que aparece con su cría en esta fotografía (*izquierda*), tienen muchos atributos conductuales y físicos masculinizados, entre ellos un clítoris semejante a un pene que se exhibe en las manifestaciones de saludo. Las parejas del serránido *Hypoplectrus unicolor* (*derecha*) se intercambian repetidamente los papeles sexuales durante la cópula.

núan apareándose, quizá para conservar las ventajas en variabilidad genética que proporciona la reproducción sexual. Eric A. Fischer, de la Universidad de Washington, demostró que las parejas del serránido hermafrodita *Hypoplectrus unicolor* alternan los papeles masculino y femenino durante apareamientos sucesivos. El sexo expresado por cada pez depende de su entorno social.

¿Cómo cambian de sexo los peces hermafroditas secuenciales? Pueden pasar de un comportamiento sexual masculino a otro femenino a los pocos minutos de haber advertido un cambio preciso en el número o en la estructura social de los peces de su alrededor. Esta rápida transformación debe ser consecuencia de señales originadas en el cerebro. En todos los vertebrados existen conexiones neuronales entre el hipotálamo y las gónadas. Leo S. Demski, de la Universidad de Florida del Sur, observó que la estimulación eléctrica de la región hipotalámica del cerebro de los serranos hermafroditas inducía la liberación de espermatozoides o de óvulos. Quizás en los hermafroditas secuenciales estos nervios alteren el entorno hormonal en el interior de la gónada; las hormonas, a su vez, tienen la responsabilidad última de ejecutar los cambios de sexualidad. En otros animales podrían darse tipos menos evidentes de cambios de sexualidad controlados por el cerebro.

La partenogénesis, o autoclonación, ofrece una posibilidad alternativa a los papeles reproductores determinados genéticamente. Las especies que realizan este tipo de replicación están constituidas sólo por hembras. Cabría pensar que las especies que practican la autoclonación no necesitan ninguna forma perceptible de comportamiento sexual. No hay tal. Las especies de lagartos de cola de látigo, o tejúes, que se reproducen mediante partenogénesis, exhiben un comportamiento de apareamiento idéntico al de las especies emparentadas que se entregan al sexo habitual, con la salvedad de que cada individuo alterna entre un comportamiento masculino y otro femenino. He llegado a la conclusión de que este comportamiento está controlado por hormonas, de un modo muy parecido a lo que ocurre en especies emparentadas de tejúes que se reproducen por cruzamiento.

La persistencia de comportamiento sexual incluso en especies compuestas exclusivamente por hembras indica que esta actividad no es un mero rasgo vestigial, sino una característica que desempeña una importante función biológica. En los lagartos de cola de látigo, las interacciones sexuales permiten que los animales pongan muchos más huevos de los que depositarían de estar solos.

Mi investigación en sexualidad animal me ha hecho ver que los comportamientos masculino y femenino, complementarios y coordinados, son cruciales para la reproducción saludable, hasta en las especies de un solo sexo. Llama la atención que en determinadas especies "normales", con machos y hembras, los miembros de un sexo sacan buen partido de esta coordinación imitando a los miembros del sexo contrario. Sin duda, tal actividad constituye otra forma no genética de diferenciación sexual.

Una perca sol, *Lepomis macrochirus*, se dedica a una curiosa estrategia de esta desviación de sexo. Wallace Dominey, de la Universidad de Cornell, y Mart R. Gross, de Toronto, distinguieron, trabajando por separado, tres formas diferentes de machos de esta especie de perca sol. Los grandes y de vistosos colores, que cortejan a las hembras y defienden su territorio. Un segundo tipo de macho más pequeño (al que con frecuencia se denomina "furtivo"), que madura sexualmente cuando es mucho más joven y de menor tamaño, y que vive en la periferia del territorio de un macho mayor, apareándose clandestinamente con las hembras mientras el dominante está ocupado en otros menesteres.

Los furtivos maduran en un tercer tipo de macho, que adquiere el comportamiento y la coloración apagada de una hembra de perca sol. Estas hembras simuladas se interponen entre un macho territorial y la hembra que éste corteja. Y es el macho imitador, más que el cortejante, el que suele terminar fecundando los huevos.

Los machos de las serpientes de jarretera de flancos rojos representan una forma similar de mimetismo sexual. En los momentos de actividad sexual máxima, los machos se congregan alrededor de las hembras, formando un ovillo de apareamiento. Robert T. Mason, de la Universidad estatal de Oregon, examinó muchos ovillos. En el 16 por ciento de los ovillos la serpiente cortejada por los machos era, según observó, un macho disfrazado, lo que llamamos un macho-hembra. Los machos-hembra poseen testículos que producen espermatozoides normales; cortejan a las hembras y se aparean con ellas. Pero, además de exhibir comportamientos masculinos típicos, sintetizan la misma feromona de atracción que las hembras adultas. En el ovillo de

apareamiento, este segundo origen de la feromona confunde a los machos normales, más abundantes, lo que confiere al macho-hembra una clara ventaja en el apareamiento.

Numerosos estudios de vertebrados inferiores demuestran que el esquema organizativo que hemos esbozado aquí ofrece una imagen incompleta de la sexualidad animal. Propongo una visión ligeramente más amplia capaz de abarcar a todos los vertebrados. Mi modelo trasciende la sexualidad determinada genéticamente que se supone en el esquema organizativo, y ofrece una visión evolutiva y más comprensiva de la sexualidad. Esta nueva concepción se basa en la premisa de que, casi con toda seguridad, los machos evolucionaron sólo después de que lo hicieran los primeros organismos autorreplicantes (y, por consiguiente, hembras).

En el modelo organizativo, la hembra es el sexo defectivo y el macho el organizado, que se impone a la hembra por la acción de hormonas. En mi modelo alternativo, la hembra es el sexo ancestral y el macho el derivado. Considérese el caso de los peces hermafroditas. Douglas Y. Shapiro, de la Universidad oriental de Michigan, ha encontrado que las especies de peces que nacen machos y se convierten en hembras, atraviesan un estadio ovárico modificado antes de desarrollar los testículos. Para mí, estas observaciones sugieren que los machos pueden ser más parecidos a las hembras de lo que las hembras se parecen a los machos.

Puesto que todo macho debe contener trazas evolutivas de índole femenina, los biólogos harían bien en centrarse menos en las diferencias entre los sexos y más en las semejanzas. Un lugar lógico en el que concentrar esta búsqueda serían las hormonas sexuales, ubicuas en los vertebrados. De hecho, algunas investigaciones en este sentido están dando ya sus resultados. Los endocrinólogos han encontrado pruebas de que el estrógeno y la progesterona, hormonas ambas que suelen asociarse con el comportamiento sexual de la hembra, intervienen en la sexualidad de ambos sexos. En algunas especies, la testosterona se convierte en estrógeno en el cerebro, y el estrógeno activa el comportamiento copulatorio en los machos y la receptividad sexual en las hembras. En las aves canoras, el estrógeno se origina en el cerebro, de lo que se deduce que su presencia trasciende las fronteras sexuales, amén de sugerir la existencia de sexualidad controlada por el cerebro en algunos vertebrados superiores.

Se admite por lo común que la progesterona inhibe la actividad sexual en los machos; se la ha empleado incluso a modo de castración química en condenas por delitos de violación. Esa hormona, creíase, no participaba en la sexualidad masculina normal. Sin embargo, las ratas macho y los hombres muestran un manifiesto ritmo diario en la secreción de progesterona; los niveles máximos aparecen al principio de la noche, cuando es más frecuente el comportamiento copulador. Diane Witt, del norteamericano Instituto Nacional de Salud Mental, Larry Young, de mi laboratorio, y yo mismo observamos recientemente que dosis fisiológicas de progesterona pueden inducir a ratas macho castradas a reanudar la cubrición. Además, inyecciones de RU 486, una hormona que anula químicamente la progesterona, reduce el comportamiento sexual en machos de rata intactos. Al igual que el estrógeno, la progesterona parece ser una hormona a la vez femenina y masculina: una reliquia evolutiva que se extiende más allá de los confines del esquema organizativo.

La investigación venidera de las semejanzas entre machos y hembras traerá nuevos ejemplos de aspectos "femeninos" de la sexualidad que sería más correcto considerar "ancestrales". Tales estudios pueden ofrecer más indicios sobre el modo de acción y los orígenes evolutivos de las hormonas sexuales. También pueden aclarar cuáles son las conexiones existentes entre los mecanismos mediante los cuales la temperatura, la función cerebral y la genética determinan el sexo. Alcanzaremos así un conocimiento más profundo y rico de la naturaleza del sexo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FUNCTIONAL ASSOCIATIONS IN BEHAVIORAL ENDOCRINOLOGY. David Crews en *Masculinity/Femininity: Basic Perspectives*. Dirigido por J. M. Reinisch, L. A. Rosenblum y S. A. Sanders. Oxford University Press, 1987.

BEHAVIORAL ENDOCRINOLOGY. Jill B. Becker, S. Marc Breedlove y David Crews. The MIT Press, 1992.

THE ORGANIZATIONAL CONCEPT AND VERTEBRATES WITHOUT SEX CHROMOSOMES. David Crews en *Brain, Behavior and Evolution*, vol. 42, n^{os}. 4-5, páginas 202-214; octubre de 1993.

THE DIFFERENCES BETWEEN THE SEXES. Dirigido por R. V. Short y E. Balaban. Cambridge University Press (*en prensa*).

En busca de la materia extraña

Entre el núcleo y las estrellas de neutrones se extiende un desierto desprovisto de materia nuclear. ¿Está acaso ocupado ese vacío por materia de quarks extraños?

Henry J. Crawford y Carsten H. Greiner

Durante algunos años, los físicos han disfrutado dándole vueltas a las piezas de un rompecabezas desconcertante. Los protones y los neutrones parecen formar, sin mayor dificultad, lo mismo agregados mínimos de materia (núcleos atómicos de diversa índole) que agregados inmensos (estrellas de neutrones); ahora bien, entremedio, es decir, entre el núcleo invisible y la estrella de neutrones ultradensa (en realidad un núcleo gigantesco que mide unos 11 kilómetros, o más, de circunferencia), no se ha detectado ninguna clase de materia nuclear. ¿Qué está sucediendo en ese intervalo? ¿Pueden las leyes de la física, según las conocemos, prohibir que las partículas nucleares se asocien y constituyan objetos capaces de llenar ese hiato "intermedio"? ¿Acontece, tal vez, que ese desierto nuclear está en realidad lleno de nuevas formas de materia, no hallada todavía y cuya estructura difiera de la propia de la materia nuclear ordinaria?

La verdad es que la teoría del Modelo Estándar, en que se inscribe nuestro conocimiento de los fenómenos físicos, se muestra coherente con la existencia de nuevas formas de materia nuclear que podrían poblar el desierto. Y si el Modelo Estándar anda en lo cierto, la detección de esta materia resolverá, a buen seguro, un enrevesado misterio cosmológico: el de la naturaleza de la materia "oculta", supuesta responsable del 90 por ciento del universo observable. Se trata, pues, de algo que vale la pena explorar.

En ese contexto estamos desarrollando, junto con expertos de otras instituciones, un proyecto de investigación en el Laboratorio Nacional de Brookhaven por el que nos proponemos dar con pruebas de la existencia de esa forma de materia nuclear, capaz de llenar el vacío.

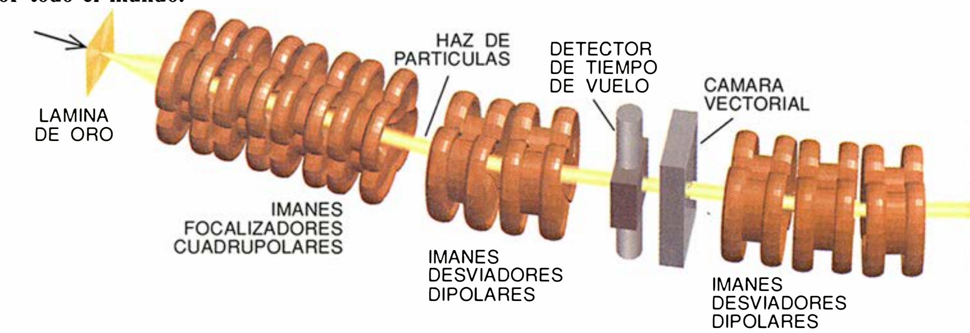
De acuerdo con el Modelo Estándar, toda la materia está formada por quarks, partículas de las que existen seis clases, agrupadas en tres conjuntos de gemelos: "arriba" ("up") y "abajo" ("down"); "extraño" ("strange") y "encantado" ("charm"); "cima" ("top") y "fondo" ("bottom"), o bien "verdad" ("truth") y "belleza" ("beauty"). Se han observado todos, salvo el quark cima. En nuestra vida cotidiana sólo intervienen dos tipos de quarks: el arriba y el abajo.

El protón consta de dos quarks arriba (cada uno de los cuales porta una carga fraccionaria de +2/3) y un quark abajo (cuya carga es de −1/3). Dos quarks abajo (−1/3, −1/3) y un quark arriba (+2/3) integran el neutrón. Las clases o sabores restantes de quarks únicamente han aparecido en el seno de partículas de vida corta. Pero, a tenor de ciertos cálculos teóricos recientes, comienza a plantearse la posibilidad de que los dos sabores de quark encontrados en la materia ordinaria combinados con el tercer sabor, el quark extraño, constituyan entidades estables. Esta materia de quarks extraños podría fácilmente agruparse en entidades cuyos tamaños cayeran entre la talla del núcleo y el de las estrellas de neutrones.

Para comprender de qué modo podría hacerse real la materia de quarks extraños, conviene seguir ahondando en el Modelo Estándar. Los protones, los neutrones y las otras partículas formadas por quarks se llaman hadrones (del griego *hadros*, que significa robusto). Por mor de simplificación plástica, los físicos describen los hadrones a la manera de "bolsas" donde los quarks se mueven con libertad de un lado a otro y sin que puedan escapar. Todas

HENRY J. CRAWFORD y CARSTEN H. GREINER están desarrollando, en el norteamericano Laboratorio Nacional de Brookhaven, un proyecto de investigación por el que se proponen producir y detectar materia de quarks extraños. Crawford se halla adscrito al laboratorio de ciencias espaciales de la Universidad de California en Berkeley, centro en donde recibió su doctorado hace 15 años. Se ha servido de satélites y aceleradores de partículas para seguir su principal línea de trabajo en astrofísica nuclear. Greiner se doctoró en 1992 por la Universidad de Erlangen-Nuremberg; goza de una beca Alexander von Humboldt y da clases en la Universidad de Duke. Le interesan los aspectos teóricos de la existencia de materia nuclear bajo condiciones extremas y lejos del equilibrio.

1. DETECTOR del Laboratorio Nacional de Brookhaven. Forma parte de un experimento para crear y descubrir materia extraña. Los cilindros rosas son contadores Cherenkov, que registran el paso de partículas de alta velocidad, portadoras de carga. Hay ya en construcción experimentos similares en otros laboratorios dispersos por todo el mundo.



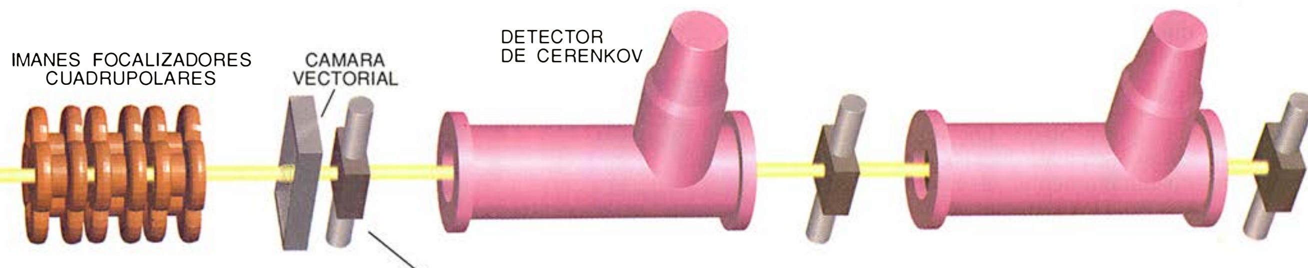
las partículas hadrónicas conocidas son bolsas que contienen tres quarks, en el caso de los bariones, o un quark y un antiquark, en el caso de los mesones. (Igual que cada partícula elemental, todo quark tiene su gemelo de antimateria.)

En el interior de la bolsa, los quarks pueden cambiar su identidad a través de la acción de la fuerza débil. Es esta interacción la responsable de las desintegraciones beta de los núcleos. La fuerza débil cambia los quarks "abajo" en quarks "arriba". Un neutrón (quark arriba, quark abajo, quark abajo, o *udd*) puede convertirse en un protón (quark arriba, quark arriba, quark abajo, o *uud*) cuando la fuerza débil cambia uno de sus quarks abajo en uno arriba (en el proceso también se emiten un electrón y un antineutrino). La fuerza débil transforma incluso el quark extraño en un quark abajo. Este efecto explica por qué no son estables las partículas que contienen quarks extraños, como la lambda (un barión dotado de un quark arriba, un quark abajo y un quark extraño) o las *K* (mesones que contienen un quark antiextraño apareado con un quark arriba o un quark abajo).

Nos estamos acercando al problema. Hemos de plantear una cuestión más ceñida. ¿Son posibles bolsas estables que comprendan más de tres quarks? No se ha detectado ninguna todavía, pero no hay razones teóricas que prohíban la existencia de dichos objetos. Y si realmente se dan, lo que está claro es que en su composición no entrarán solamente los quarks arriba y abajo.

Fijémonos en el deuterón; este núcleo de hidrógeno pesado consta de un protón y un neutrón, es decir, de seis quarks. Por resultados experimentales sabemos que, aunque el protón y el neutrón están ligados en un deuterón, los seis quarks componentes de los dos hadrones prosiguen en una agrupación distinta en sendas bolsas de tres: el paquete protón (*uud*) y el paquete neutrón (*udd*). Tal situación no sería posible si hubiera una sola bolsa para los seis quarks que tuviera menos energía que el deuterón, pues entonces los quarks del deuterón se reagruparían espontáneamente en dicho estado. Podríamos generalizar el razonamiento a otros núcleos y concluir que, si las bolsas de más de tres quarks arriba y abajo fueran estables, no existiría la materia tal como la conocemos, ni existiría nunca.

Pero, ¿qué sucedería si se añadieran quarks extraños a las combina-



ciones de quarks arriba y abajo? Tal materia de quarks extraños consistiría en una cuantía aproximadamente igual de quarks arriba, quarks abajo y quarks extraños, agrupados en una misma bolsa. En 1971 Arnold R. Bodmer, de la Universidad de Illinois, analizó la nueva forma de materia y propuso la existencia de agregados de múltiples quarks extraños; agregados, mucho más comprimidos que los núcleos corrientes, que constituirían formas exóticas, de larga vida media, de materia nuclear en el interior de las estrellas.

Sui Chin y Arthur K. Kerman, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, por un lado, y Larry D. McLerran, de la Universidad de Minnesota, y James D. Bjorken, de Stanford, por otro, retomaron la cuestión. Adujeron varias razones generales que explicaban por qué debería ser estable la materia de quarks extraños. Igual que los electrones cuyas órbitas giran en torno al átomo, los quarks de la bolsa hadrónica ocupan distintos niveles de energía, o estados cuánticos. En virtud del principio de exclusión de Pauli (análogo cuántico del principio de Arquímedes según el cual dos cuerpos no pueden ocupar el mismo espacio al mismo tiempo), sólo un quark puede ocupar cada estado cuántico. Una razón de la estabilidad de la materia constituida por quarks extraños podría estribar en la ausencia de estados de energía vacíos para recibir los quarks abajo que resultarían de la desintegración débil de los quarks extraños: los estados de quarks abajo de menos energía se encuentran ya ocupados.

Ese principio nos aclara la estabilidad de los núcleos normales: un neutrón libre se desintegra en un protón en 11 minutos aproximadamente, pero en los núcleos estables los neutrones pueden existir prácticamente por siempre; ello es así, por el motivo siguiente: si el neutrón se desintegrara, no habría estados cuánticos vacíos para recibir al nuevo protón recién creado. Los núcleos en los que hay estados de energía vacíos para el protón son radiactivos y experimentan la desintegración beta.

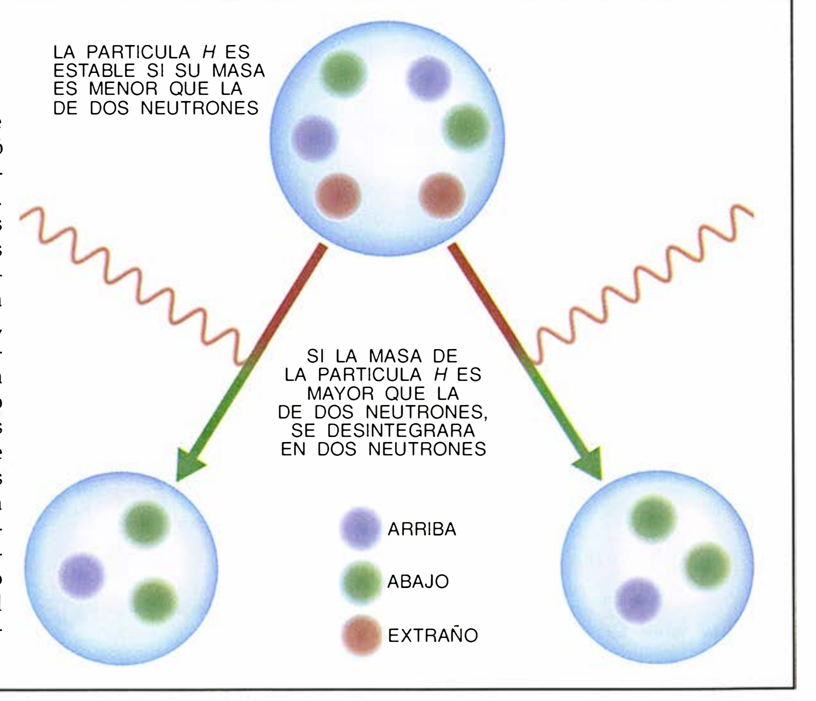
Pero, ¿de dónde sale la capacidad de la materia constituida por quarks extraños para llenar el intervalo que media entre el núcleo y la estrella de neutrones? La materia nuclear consta, casi a partes iguales, de protones, que portan una unidad de carga, y neutrones, que carecen de carga. La repulsión electroestática de los protones dotados de la misma carga en un núcleo crece conforme aumenta el número de protones. Por último, la repulsión electrostática supera la fuerza fuerte que mantiene unidos a los núcleos, lo que determina que el tamaño de los núcleos estables tenga un límite.

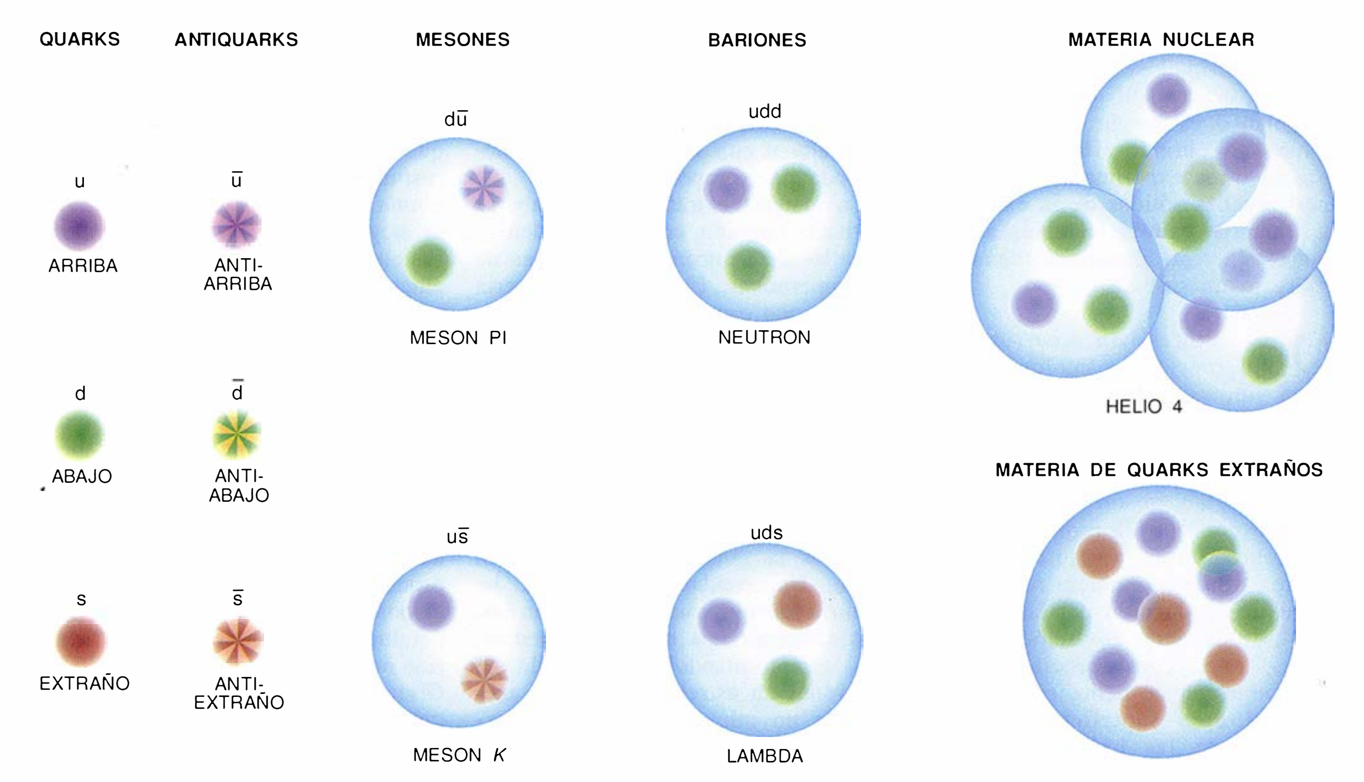
De muy distinta manera se presenta la situación en una bolsa de quarks que contenga materia extraña. Las leyes de la mecánica cuántica dictan que, en el equilibrio, los tres sabores de quarks encerrados en una bolsa multiquark comparten por igual la energía disponible. El quark extraño posee una masa mayor que el quark arriba o quark abajo; habrá, pues, menos quarks extraños en una porción material constituida por éstos (siendo equivalentes la masa y la energía). La carga eléctrica del quark arriba, que es +2/3 la del electrón, quedará, por tanto y en buena parte (aunque no del todo), cancelada por la suma de las cargas —1/3 que transportan los quarks abajo y extraño. En consecuencia, la materia de quarks extraños debe llevar sólo una carga positiva muy pequeña y, en virtud del cuasi-equilibrio entre las cargas positiva y negativa, tendrá así que liberarse del límite de tamaño que afecta a la materia nuclear ordinaria. Podrían existir, pues, grandes porciones estables de materia de quarks extraños.

Si se dieran en la realidad, su presencia podría resolver un enigma astrofísico que viene de lejos. Basados en minuciosas observaciones de las galaxias, los astrofísicos han llegado a la conclusión de que en el universo se esconde muchísimo más de lo que percibe el ojo. Los campos gravitacionales combinados de todas las estrellas visibles y del polvo galáctico luminoso están lejos de alcanzar intensidad suficiente para producir los movimientos de las galaxias o de sus estrellas integrantes. Los cálculos ponen de manifiesto que la cantidad de material que falta es enorme; como mínimo, el 80 por ciento de toda la materia del universo es fría y oscura, indetectable por ningún telescopio óptico o de radio.

Estabilidad de la materia constituida por quarks extraños

En 1977 Robert L. Jaffe, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, consideró la posibilidad de que partículas que constaran de más de tres quarks fueran estables. Empezó imaginando un estado ligado de dos partículas lambda, cada una de las cuales integrada por un quark arriba, un quark abajo y un quark extraño. Llamó partícula *H* a ese estado; y señaló que, para ser estable, debería tener un peso menor que dos partículas lambda. En caso contrario, no tardaría en desintegrarse en dos lambdas. Advirtió también que la partícula *H* pesaría menos que dos neutrones, para ser absolutamente estable; si no, cada uno de los dos quarks extraños se desintegraría, por la interacción débil, en un quark abajo. Los quarks resultantes podrían entonces formar dos neutrones. Desafortunadamente, el cálculo preciso de la masa de la partícula *H* a partir del Modelo Estándar está más allá de la capacidad actual de los físicos.





2. QUARKS EN DIFERENTES COMBINACIONES forman todas las partículas hadrónicas conocidas. Sólo los dos quarks más ligeros, el "arriba" y el "abajo", son necesarios para crear la materia ordinaria del tipo que da cuenta del mundo que nos rodea y del universo visible. Un tercer tipo, el quark "extraño", se ha encontrado sólo en partículas inestables. En condiciones normales, los quarks se comportan como si estuvieran confinados en bolsas, en cuyo interior pueden moverse libremente, si bien no pueden salir. Los bariones constan de tres quarks; los mesones, de un quark y un antiquark. No se ha observado ninguna otra combinación de quarks.

En 1984 Edward Witten, de la Universidad de Princeton, planteó una posibilidad sugestiva: la masa que falta, que encierra la mayor parte del universo, sería materia constituida por quarks extraños. El modelo de Witten comienza en los albores del universo, al poco de ocurrir la gran explosión y antes de que empezaran a formarse los núcleos ligeros. El cosmos era entonces tan caliente y denso que los quarks se movían con entera libertad. Witten postuló que la materia de quarks extraños se formó a partir de esta fase de quarks en los primeros 10^{-6} segundos después de la gran explosión. El diámetro de cada una de estas bolitas estaba comprendido entre 10^{-7} y 10 centímetros. En cada bolita habría entre 10^{33} y 10^{42} quarks, y cada una pesaría de 10^{9} a 10^{18} gramos. Una bolita del tamaño de una pelota de béisbol podría pesar más de un billón de toneladas. Ahora bien, por culpa de su tamaño mínimo, las bolitas en cuestión dispersarían muy poca luz y sería casi imposible observarlas directamente.

Adaptando los cálculos utilizados para predecir la masa de los hadrones ordinarios, Edward H. Farhi y Robert L. Jaffe, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han observado que las migajas de materia de quarks extraños (llamemos así a los "strangelets") podrían ser estables en un intervalo de tamaños mucho mayor que el predicho por Witten. Si Farhi y Jaffe andan en lo cierto, bastaría la materia constituida por quarks extraños para llenar el gigantesco desierto nuclear. Este cuadro imaginario no contraviene ningún principio conocido de la física.

El alertado lector, sin embargo, podría temer una potencial consecuencia catastrófica de la existencia de esas migajas de materia de quarks extraños más ligeras que los núcleos ordinarios: la materia ordinaria podría desintegrarse en ellas. Farhi y Jaffe nos aseguran que, aunque la posibilidad no está descartada, la probabilidad es tan pequeña que resulta improbable que ocurriera en un tiempo mucho mayor que la edad actual del universo.

Si la materia constituida por quarks extraños explicara el 80 por ciento de la masa del universo, parecería lógico que algún fragmento de la misma cayera en alguna ocasión sobre nuestro planeta. Alvaro de Rújula, del CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, y Sheldon L. Glashow, de la Universidad de Harvard, han calculado los efectos que ejercerían esos hipotéticos encuentros. Determinaron que la Tierra podría frenar y detener una migaja (un "strangelet", recuérdese) de menos de unos 10^{14} quarks. Tales encuentros podrían semejarse a sucesos meteoríticos insólitos, terremotos con características especiales o huellas distintivas de partículas en caolín arcaico. Las bolitas de más de 10^{23} quarks tendrían demasiada cantidad de movimiento para que el choque las frenara; atravesarían simplemente la Tierra. Los tamaños predichos en el modelo de Witten no podrían observarse en absoluto.

Cabría la posibilidad de que se hubieran desgajado, de pellas mayores, bolitas constituidas por menos de unos 10^{7} quarks y haber quedado incrustadas en material meteorítico o cortical, donde se comportarían de manera muy parecida a los núcleos típicos. En la Universidad de Mainz, Klaus Lützenkirchen y sus colegas alemanes e israelíes han empezado a buscar tales migajas en los meteoritos. Lützenkirchen ha ideado un ingenioso método para rastrear esos cuerpos mínimos de quarks extraños en los meteoritos; se funda en que las migajas son mucho más pesadas que los núcleos corrientes. Dirige un haz de núcleos de uranio sobre los meteoritos y busca los que rebotan directamente hacia atrás, como si

golpearan un muro de ladrillo. Por física elemental se sabe que ese fenómeno ocurre sólo cuando la masa del blanco es mayor que la de los núcleos de uranio. Hasta ahora, ni este ni otros experimentos han aportado pruebas sólidas de la existencia de materia extraña estable, aunque han establecido algunos límites en el intervalo de sus masas.

Otros autores han recurrido a la observación cosmológica para poner límites a la cantidad de materia de quarks extraños que habría en el universo. Si las bolitas extrañas se hubieran formado en la gran explosión, habrían absorbido neutrones, bajando por tanto la proporción entre neutrones libres y protones. Este efecto, a su vez, hubiera rebajado el ritmo de producción del isótopo helio 4. La tasa de absorción de neutrones, y en consecuencia el ritmo de producción de helio, es muy sensible al área superficial total del conjunto de las bolitas presentes. Para una cantidad de masa determinada, el área superficial depende del tamaño y número de partículas: el área superficial total de muchos fragmentos pequeños supera en mucho la de pocos trozos mayores, aun cuando ambos conjuntos tengan la misma masa. Por tanto, cuanto menores (y más numerosas) sean las distintas bolitas, mayor será la absorción total de neutrones.

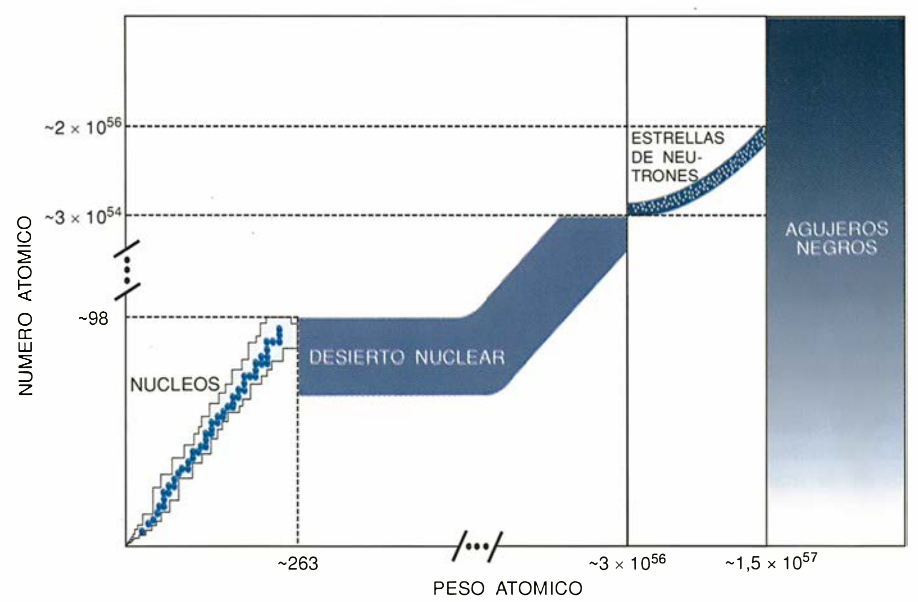
K. Riisager y Jes Madsen, de la Universidad danesa de Aarhus, cuantificaron esta aseveración. Descubrieron que las bolitas de quarks primordiales debían estar formadas por más de 10^{23} quarks si su existencia hubiera de ser compatible con la cantidad calculada de materia oscura que falta y con la concentración observada de isótopos ligeros.

La materia extraña podría haberse formado también en las superdensas estrellas de neutrones, remanentes de las supernovas. Una gota de materia extraña que cayera en una estrella de neutrones podría atacarla, cual si fuera un virus, comiéndose neutrones. La razón de semejante voracidad estriba en que los neutrones, al ser eléctricamente neutros, no repelen la gotita que se acerca, que tiene una pequeña carga positiva; los quarks de los neutrones son absorbidos por la gota. Angela V. Olinto, de la Universidad de Chicago, ha demostrado que una gota extraña podría consumir una estrella de neutrones, transformándola de estrella de neutrones en estrella extraña, en menos de un minuto. Una estrella extraña sería más compacta que una estrella de neutrones por la sencilla razón de que estaría ligada por las fuerzas intrínsecas de los quarks.

A imagen de la patinadora en la pista sobre hielo que gira con sus brazos pegados al cuerpo, la menor estrella extraña giraría con mayor celeridad que la estrella de neutrones, velocidad de rotación que podría detectarse. La observación de un púlsar de medio milisegundo constituiría una prueba sólida de la existencia de una estrella extraña, ya que las estrellas de neutrones no pueden girar con tamaña rapidez. Los astrofísicos están buscando impacientemente tales objetos.

En ausencia de estrellas extrañas que giren rápidamente, resulta inverosímil que las técnicas de la astronomía observacional disponibles hasta hoy detecten la materia extraña. Físicos nucleares y de partículas han empezado a buscar, en los potentes aceleradores, pruebas más directas de la materia constituida por quarks extraños. Compete a los experimentalistas, provocando colisiones frontales de dos núcleos pesados a las más altas energías, simular en el laboratorio muchas de las condiciones del comienzo del universo. Tales “pequeñas grandes explosiones” proporcionan una importante herramienta para producir excitantes e inesperadas redisposiciones de quarks a altas temperaturas y presiones (*véase* “Materia nuclear caliente”, por Walter Greiner y Horst Stöcker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1985; y “La ecuación de estado nuclear”, por Hans Gutbrod y Horst Stöcker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1992).

La formación de las pequeñas explosiones precisa de choques de los núcleos más pesados a las más altas energías alcanzables. Cuando iones pesados, tales como el oro y el plomo, chocan entre sí, se desencadenan ondas de choque que calientan la materia nuclear. La energía de los núcleos lleva a la producción de una bola de fuego y a la formación de un aluvión de hadrones exóticos.



3. MAPA DE NUCLIDOS que muestra todas las formas conocidas de materia estable. Entre los más pesados elementos atómicos y las estrellas de neutrones, que son núcleos gigantes, media un vasto y despoblado desierto nuclear. La verdad es que semejante vacío podría estar ocupado por materia de quarks extraños.

Podemos asociar dos gotas de líquido a dos núcleos pesados que colisionen a grandes energías. En el choque, aumenta la temperatura del líquido. Conforme eso va ocurriendo, sufre una transición de fase y se convierte en un gas compuesto de todo tipo de partículas hadrónicas. Si la energía del choque es lo suficientemente elevada, las bolsas de los hadrones se romperán, dejando a los quarks plena libertad de movimiento. La materia nuclear experimenta una segunda transición de fase, convirtiéndose en un plasma de quarks y gluones libres que se parece al estado del universo inmediatamente después de la gran explosión. (Los gluones son las partículas que, en condiciones normales, mantienen juntos los quarks.) El plasma contendrá los quarks arriba y abajo de los núcleos originales, además de números iguales de quarks y antiquarks extraños, creados directamente por la energía de la colisión.



Pavel Alekseicvich Cherenkov recibió en 1958 el premio Nobel de física por su investigación e interpretación de la radiación de Cherenkov. Siendo alumno todavía, en los años treinta, del Instituto Lebdev de Moscú, recibió el encargo de S. I. Vasilov de estudiar qué sucedía cuando la emisión procedente de una radiofuente penetraba, absorbida, en diferentes fluidos. Descubrió que los electrones secundarios constituían la causa principal de la radiación visible. El efecto Cherenkov fue modelizado por Ilya Frank e Igor Tamm, quienes compartieron el Nobel con él. Los contadores de Cherenkov, que registran el tránsito de las partículas elementales, se fundan en dicho efecto: cuando una partícula cargada atraviesa un medio a una velocidad mayor que la velocidad de la luz en dicho medio, emite una onda de choque luminosa.

A imagen de lo que aconteció en los momentos subsiguientes a la gran explosión, el plasma de quarks y gluones comienza de inmediato a enfriarse. Los quarks se condensan de nuevo en bolsas en un proceso de hadronización. Proporcionar una demostración directa de la existencia de ese instante fugaz del plasma integrado por quarks y gluones resulta ser una tarea harto compleja. Durante esa transición del plasma a gas hadrónico pueden formarse gotas de quarks que viven lo suficiente como para ser observadas.

El mecanismo de la formación de las migajas de quarks extraños a partir de un plasma de quarks y gluones que se enfría fue propuesto por Han-Chao Liu y Gordon L. Shaw, de la Universidad de California en Irvine, e independientemente por Peter Koch, de la Universidad de Bremen, Horst Stöcker, de la Universidad de Frankfurt, y uno de nosotros (Greiner). Se partió del supuesto según el cual los quarks antiextraños que se encuentran en igual número que los quarks extraños en el plasma de quarks y gluones (los quarks extraños y sus gemelos de antimateria deben ser producidos por parejas) se combinan con los abundantes quarks ligeros arriba y abajo de los núcleos originales para formar mesones *K*. La generación de bariones extraños, así el lambda, a partir de los quarks extraños sobrantes, según cálculos realizados por Stöcker y Greiner, es energéticamente más cara que producir lo que venimos llamando migajas ("strangelets"). Esta hipótesis sugiere que, si la materia constituida por quarks extraños existe a bajas temperaturas, debería condensarse a partir de una masa enfriante de plasma de quarks y gluones.

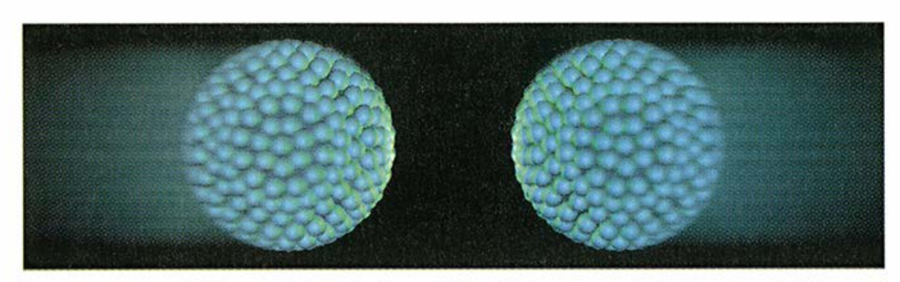
Para detectar bolas de materia de quarks extraños, los físicos experimentales se ven obligados a proyectar estrategias posibles que permitan separarlas del flujo de materia hadrónica normal. Pero encuentran una dificultad: constituyen una nueva forma de materia, no un tipo especial de partícula. Normalmente, el investigador diseña un experimento para descubrir una partícula de una determinada masa, bien definida. Pero las gotas de la materia de quarks extraños pueden adquirir prácticamente cualquier masa.

La clave para la detección de bolas de materia constituida por quarks extraños reside en aprovecharse de su menguada razón de carga a masa, a la que aludíamos más arriba. Para la materia nuclear normal, esta proporción va desde 1:3 en el caso del isótopo tritio del hidrógeno, dotado de dos neutrones y un protón, hasta 1 para el protón único del núcleo de hidrógeno. La mayoría de los núcleos tienen aproximadamente el mismo número de protones que de neutrones, lo que les confiere una razón de carga a masa de 1:2. La materia extraña, por contra, debería presentar una proporción entre carga y masa de sólo ±1:10 o ±1:20, lo que la haría fácil de distinguir de la materia ordinaria.

El mejor instrumento por el que podamos optar es el espectrómetro magnético. En este dispositivo, un campo magnético muy intenso desvía los haces de partículas cargadas. Midiendo el ángulo de desviación y la velocidad de la partícula al entrar en el espectrómetro magnético, es fácil obtener la razón de carga a masa de una partícula. Hay ya en marcha diversos experimentos que se sirven del espectrómetro magnético en su búsqueda de materia de quarks extraños.

La primera búsqueda de alta precisión de la materia de quarks extraños y de otras partículas creadas en colisiones nucleares de alta energía corre a cargo de uno de los autores (Crawford), con la colaboración de otros físicos norteamericanos y japoneses. Se está desarrollando en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. En este experimento, un haz de núcleos de oro, que viajan a velocidades cercanas a la de la luz, chocan contra un blanco formado por una lámina de oro. En cada colisión se producen entre 500 y 1000 partículas. El experimento de Brookhaven limita su examen a las contadas partículas que viajan en la dirección del haz, focalizadas mediante una serie de imanes.

Las partículas llegan primero al espectrómetro magnético, donde se mide el ángulo de desviación producido a su paso a través de un intenso campo magnético. Se miden luego las velocidades de las partículas; y se hace por un doble procedimiento: para las partículas lentas y las partículas rápidas. Se determina la velocidad de las partículas más lentas observando su curso por una serie de detectores denominados contadores de centelleo, delgadas láminas de plástico que desprenden débiles destellos de luz a medida que las partículas cargadas las van atravesando; se calcula la velocidad midiendo cuánto tardan las partículas en pasar de un detector a otro y dividiendo por este valor la distancia entre los





4. UNA "PEQUEÑA GRAN EXPLOSION" se crea en un acelerador de partículas cuando chocan dos núcleos pesados (*arriba*), produciendo un plasma caliente de quarks y gluones; estos últimos son las partículas que mantienen juntos a los quarks. A medida que el plasma se enfría, la mayoría de los quarks se combinarán para formar las partículas hadrónicas usuales para los físicos. Los mesones *K* positivos se llevan los quarks antiextraños, permitiendo al quark extraño formar migajas de quarks extraños, los "strangelets".

detectores. Para medir la velocidad de las partículas más rápidas se emplea un detector de Cherenkov. El contador de Cherenkov aprovecha la propiedad siguiente: cuando una partícula cargada atraviesa un medio a una velocidad mayor que la velocidad de la luz en dicho medio, emite una onda de choque luminosa. Combinando el ángulo de desviación y la velocidad se obtiene la razón de carga a masa.

El espectrómetro que se está construyendo en Brookhaven es bastante sencillo. El inconveniente, una limitación seria, es que ese detector sólo puede ver partículas que emergen formando un ángulo pequeño con el haz. Viene a ser algo así como observar un objeto con un potente microscopio; la imagen puede poseer mucho contraste, pero la zona a contemplar es pequeña, y resulta difícil hallar un objeto sutil en un campo grande. El espectrómetro de Brookhaven tiene también un estrecho intervalo de sensibilidad. La materia extraña cuya proporción de carga a masa sea inferior a 1:40 no puede detectarse.

Para aumentar la sensibilidad restringida del detector contamos con una doble opción, a saber, disminuir el poder de ampliación o construir un detector mayor. Ambos caminos se están explorando por diferentes equipos de físicos que investigan la materia constituida por quarks extraños. El grupo de P. Buford Price, de la Universidad de California en Berkeley, ha adoptado la primera solución. Su experimento es sensible a partículas lentas y pesadas, que apenas si sufren desviación por parte del campo magnético.

En Brookhaven, el grupo de Jack Sandweis, de la Universidad de Yale, se apresta a trabajar con el otro método. Están construyendo un espectrómetro gigantesco no focalizador, o de geometría abierta. Sin imanes focalizadores, su aparato experimental es de casi 30 metros de largo. Sus detectores miden ocho metros de ancho por tres de alto. Dada la magnitud del dispositivo, muchas partículas entran en el espectrómetro después de cada colisión, lo que añade complejidad a su funcionamiento.

El CERN, cuyos aceleradores proporcionan partículas de mucha mayor energía que la conseguida en Brookhaven, ha abordado un programa de búsqueda de nuevas formas de materia. El grupo de Klaus Pretzl, de la Universidad de Berna, se propone realizar choques entre núcleos de plomo. Utilizarán un espectrómetro parecido al instalado en Brookhaven, aunque su aparato tiene casi 500 metros de largo. Este experimento dispondrá de sus primeros haces a lo largo de este año.

Inspirada en cálculos teóricos, la búsqueda de la materia de quarks extraños está encarrilada. Su detección, ya sea en la Tierra, en el cosmos o en choques subatómicos con los aceleradores de partículas más potentes del mundo, ayudará a esclarecer la naturaleza de los quarks, la estructura de la materia y la composición del universo. El descubrimiento confirmaría que el mundo es el lugar extraño que imaginan los físicos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INTRODUCTION TO HIGH-ENERGY PHYSICS. Donald H. Perkins. Addison-Wesley Publishing, 1987.

FROM QUARKS TO THE COSMOS: TOOLS OF DISCOVERY. Leon M. Lederman y David N. Schramm. Scientific American Library, 1989.

THE NUCLEAR EQUATION OF STATE, Part B: QCD AND THE FORMATION OF THE QUARK-GLUON PLASMA. Dirigido por Walter Greiner y Horst Stöker. Plenum Press, 1989.

SIMULATING HOT QUARK MATTER. Jean Potvin en *American Scientist*, volumen 79, número 2, páginas 116-129; marzo/abril 1991.

Las primeras redes de datos

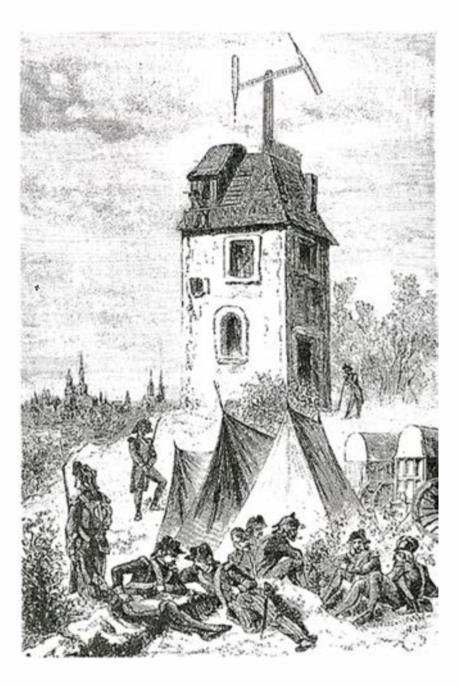
La telegrafía óptica, hoy casi olvidada, doscientos años atrás transportaba mensajes a cientos de kilómetros en unos minutos

Gerard J. Holzmann y Björn Pehrson

Suele creerse que las grandes redes de comunicaciones nacieron en nuestro siglo. Muchos todavía recuerdan cuándo llegó el teléfono a su barrio, y sin duda los jóvenes de hoy contarán a sus nietos cómo era el mundo antes de existir la red Internet. Sin embargo, las primeras redes de datos nacionales no son cosa del siglo XX. Mucho antes de aparecer el telégrafo electromagnético, funcionaban sistemas de comunicaciones ópticos en numerosos países europeos, con centenares de estaciones repartidas por todo su territorio.

Los dos primeros sistemas fueron construidos en la última década del siglo XVIII por el clérigo francés Claude Chappe y el aristócrata sueco Abraham Niclas Edelcrantz. No es de extrañar su afán por conseguir sistemas telegráficos operativos, ya que desde la antigüedad innumerables científicos e innovadores habían probado a enviar mensajes a largas distancias. Pero su verdadera hazaña fue acertar donde todos sus antecesores habían fracasado. Y ello en las circunstancias más adversas: dentro de una violenta revolución en Francia, y en medio de continuos golpes de estado, en Suecia.

El 14 de julio de 1789, cuando la toma de la Bastilla inicia la Revolución francesa, Chappe tiene 25 años. Ordenado sacerdote, en noviembre le suprimen el estipendio y tiene que volver a su villa natal, Brûlon, cercana a Le Mans. También sus cuatro hermanos, Ignace, René, Pierre-François y Abraham, pierden, en los hechos revolucionarios, su medio de vida y regresan al hogar. Por suerte la familia Chappe no carece de bienes, y Claude, ayudado por sus hermanos, empieza a experimentar en física. Pronto consigue entrar en la Société Philomatique, sociedad de físicos radicada en París, y de 1789 a 1793 publica cinco ensayos sobre temas de física, en los que aborda repetidamente el problema de la transmisión de impulsos eléctricos por hilos. Aunque se sabía de ciertos avances en tal sentido, los principios de la electricidad no eran suficientemente conocidos para poder construir un telégrafo práctico.



Tal vez decepcionado por su fracaso en el telégrafo eléctrico, Chappe encara las soluciones ópticas. El 2 de marzo de 1791 expone ante el público un primer sistema, en el que cada estación constaba de un reloj de péndulo modificado y un gran panel pintado de blanco por una cara y de negro por la otra. Las esferas del reloj se dividían en diez partes, marcada cada una con un número. Una única manecilla o puntero daba una vuelta entera a la esfera del reloj al menos dos veces por minuto.

Al principio de la transmisión, el operador emisor volteaba el panel en señal de que la manecilla de su reloj pasaba por el cenit; en ese momento el receptor, que lo observaba por catalejo desde el otro extremo, echaba a andar su reloj. A partir de entonces, se enviaban números volteando el panel de blanco a negro cada vez que la manecilla del reloj emisor pasaba por la posición adecuada. El receptor miraba por dónde iba su reloj en ese instante y así sabía qué número se había querido transmitir. El conjunto de números expresaba una codificación de los mensajes, según un diccionario de letras, palabras y frases elaborado al respecto. La velocidad del telégrafo venía regulada por el ritmo de giro de la manecilla del reloj.

En esta primera prueba, realizada entre el castillo de Brûlon y una casa de la ciudad de Parcé distante 16 kilómetros, se envía una frase, elegida por el médico local, Dr. Chenou: "Si vous réussissez vous serez bientôt couvert de gloire" ("Si logra usted éxito, pronto se cubrirá de gloria"). El mensaje se transmite en cuatro minutos aproximadamente.

Pertrechado con las declaraciones juradas de los testigos de su experi-

1. TORRE DE SEMAFORO recientemente reconstruida en Marcy-sur-Anse (*página opuesta*). Se erigió en 1804 formando parte de la línea que unía París con Lyon. El grabado (*arriba*) muestra una estación de la línea a Lille, construida en 1794.

GERARD J. HOLZMANN y BJÖRN PEHRSON, tras muchos años de estudio de la historia de las telecomunicaciones por separado, descubrieron su afinidad de intereses en 1989 y colaboran desde entonces. Holzmann, doctor por la Universidad Tecnológica de Delft, investiga en los laboratorios Bell de AT&T sobre diseño y comprobación de protocolos de comunicaciones, procesamiento distribuido y gráficos informatizados. Pehrson, doctorado en 1975 por Uppsala, preside el departamento de teleinformática del Real Instituto de Tecnología en Estocolmo.

mento, Chappe se traslada a París en busca de fondos para pruebas de mayor envergadura. Allí afronta serios peligros en más de una ocasión, y ve cómo las turbas revolucionarias destruyen sus telégrafos por creerlos instrumentos de una conspiración monárquica.

El 22 de marzo de 1792 presenta una propuesta formal a la Asamblea Legislativa, contando para ello con el apoyo de su hermano mayor, Ignace, que entretanto había sido elegido miembro de dicha Cámara. En su breve discurso ante la Asamblea el 24 de marzo, Claude ofrece un invento utilizable para enviar "mensajes, órdenes de combate o cualquier cosa imaginable" a cualquier lugar del país en cuestión de minutos.

De momento, no pasa nada. El caso va rodando de una comisión a otra, hasta que, por fin, el 1 de abril de 1793, el diputado Charles-Gilbert Romme (más conocido por haber introducido el calendario republicano francés) interviene en favor de Chappe. En su persuasivo discurso ensalza esta invención y subraya su gran potencial para fines militares. Esto tenía que hacer mella en la Asamblea, pues la República se encontraba en guerra con muchos de sus países vecinos. Se aprueba, pues, la propuesta de Chappe para financiar un experimento. En ese preciso momento se acuña un nuevo término para describir el dispositivo de Chappe: *télégraphe* (telégrafo, "el que escribe a distancia"). Hasta entonces, Chappe había jugueteado con el término *tachygraphe* ("el que escribe deprisa"), que no describía con precisión la función realizada.

A raíz de ello se construyen tres estaciones telegráficas bajo protección oficial. La primera en París, en el parque Le Peletier Saint-Fargeau de Belleville; la segunda en los altos de Écouen, a unos 16 kilómetros al norte, y la tercera en Saint-Martin-du-Tertre. Por aquel entonces ya había abandonado Chappe la idea del péndulo y, tras tantear diversas opciones, se había decidido por un sistema semafórico. En el mástil del semáforo iba fijado un largo travesaño horizontal, llamado *regulador*, con sendos brazos más cortos en sus extremos que se denominaban *indicadores*. El conjunto parecía remedar una persona con los brazos abiertos y una banderola de señales en cada mano. Regulador e indicadores podían girar sobre sus ejes, variando sus posiciones en incrementos angulares de 45 grados, lo cual bastaba para codificar cientos de símbolos.

Las primeras señales se intercambian el 12 de julio de 1793. Uno de los observadores, Pierre Daunou, transmite en once minutos lo siguiente: "Daunou ha llegado. Anuncia que la Asamblea Nacional acaba de autorizar a su Comisión de Seguridad General a que selle los escritos de los diputados." La respuesta se recibe nueve minutos después, seguramente fruto de una mayor atención: "Los habitantes de esta hermosa región merecen la libertad por su respeto a la Asamblea Nacional y a sus leyes."

Al cabo de pocas semanas, la Asamblea decide el establecimiento de un Telégrafo estatal y costea la construcción de una línea de 15 estaciones que enlazan a París con Lille, distante unos 190 kilómetros al norte y fronteriza con los Países Bajos, entonces bajo dominio austríaco. Claude Chappe es nombrado *Ingénieur Télégraphe*, con un sueldo de 600 francos al mes y el uso permanente de cabalgadura del gobierno. A petición suya, sus hermanos Abraham, Ignace y Pierre-François son los primeros administradores designados para esa línea.





2. LAS REDES TELEGRAFICAS crecieron hasta cubrir la mayor parte de Europa antes de 1850. La red francesa era la más extensa (en rojo lo construido antes de 1810, y en negro lo posterior). El sistema de Suecia utilizaba obturadores en lugar de semáforo. En el recuadro se indica la primera línea experimental, construida en 1795.

En un año Chappe completa la línea, y el 15 de agosto de 1794 llega a París el primer mensaje oficial. Este despacho anunciaba la nueva toma de la ciudad de Le Quesnoy a los austríacos y prusianos, y se había transmitido dentro de la hora siguiente al final de la batalla, impresionando sin duda a los diputados. El 30 de agosto el telégrafo vuelve a dar buenas noticias: la captura de Condé. Textualmente, “Condé être restitué à la Republique. Reddition avoir eu lieu ce matin à six heures” (“Condé ser devuelto a la República. Rendición haber tenido lugar esta mañana a las seis”). Más partes de esta índole se suceden a medida que las tropas francesas avanzan hacia Holanda. Crece así el prestigio de Chappe y de su telégrafo ante el gobierno. El tres de octubre de ese año se aprueba la instalación de una segunda línea telegráfica, de París a Landau.

La construcción de esta nueva línea se retrasa por falta de dinero: se tardan cuatro años en alcanzar Estrasburgo. La administración telegráfica decide entonces terminar allí la línea, y en cambio prolongar la línea París-Lille en 64 kilómetros, hasta Dunkerque. Mientras tanto, y a petición de la marina, se va construyendo otra línea que une París con el puerto de amarre de la flota en Brest, a 210 kilómetros de distancia. Al término de esta fase de construcción, en 1799, hay en total unas 150 estaciones de telegrafía óptica en servicio.

Cuando Napoleón Bonaparte toma el poder aquel mismo año, ordena construir una línea de 95 kilómetros desde Estrasburgo a Huningue. En 1803, se instalan líneas de Lille a Bruselas (96 kilómetros) y de Lille a Boulogne (110 kilómetros), esta última con miras a una posible invasión de Inglaterra.

Tal propósito era indudable, pues dos años antes Napoleón había encomendado al más joven de los Chappe, Abraham, el diseño de un telégrafo capaz de atravesar el Canal de la Mancha. Abraham concibió un gran semáforo con dos brazos y lo probó en julio de 1801 entre Belleville y Saint-Martin-du-Tertre, a una distancia parecida a la que separa Boulogne de Dungeness. Incluso hay noticia de la construcción de un semáforo en Boulogne, pero al desistir de la invasión pronto fue abandonado.

En 1804 Napoleón ordena construir la línea más larga, de París a Milán pasando por Dijon, Lyon y Turín, 720 kilómetros en total. Al cabo de un año, la telegrafía óptica cubre gran parte de Francia, y de París parten cuatro grandes ramales en dirección de los puntos cardinales, en muchos casos siguiendo los viejos caminos de las diligencias.

Claude Chappe, llegado a la cumbre, parece no haber saboreado nunca su triunfo. Ha sufrido cada vez más los ataques de otros inventores, que pretenden haberse anticipado a su telégrafo o superado sus prestaciones. A finales de 1804 cae enfermo durante la inspección rutinaria de una de las nuevas líneas, y teme haber sido envenenado por algún enemigo. Tras larga convalecencia regresa a París, pero se hunde en una depresión irreversible, y el 23 de enero de 1805 termina por arrojarse a un pozo frente a la administración telegráfica, en el Hotel Villeroy.

Los restantes hermanos Chappe continúan instalando telégrafos. Napoleón estaba convencido del valor de los semáforos de Chappe y los utilizaba en sus campañas para notificar con rapidez los movimientos de tropa y poder burlar así al enemigo. En 1812 encarga a Abraham el desarrollo de un semáforo móvil que pudiera desplegarse durante la campaña de Rusia.

Al mismo tiempo que se construían sistemas de telégrafo óptico, evolucionaba el método empleado por los operadores para transmitir información. El primer código telegráfico era una adaptación del creado en 1791 para el telégrafo de péndulo. Contenía 9999 entradas numéricas: las nueve primeras eran de un solo dígito (del 1 al 9) y por tanto se transmitían con una sola señal; las 89 siguientes, del 10 al 99, requerían dos señales (una por cada dígito); del 100 al 999 se necesitaban tres señales, y cuatro desde el 1000 al 9999. Para abreviar

las transmisiones se asignaban los números más bajos a las palabras y frases más frecuentes —lejano antecedente de las modernas técnicas de compresión de datos.

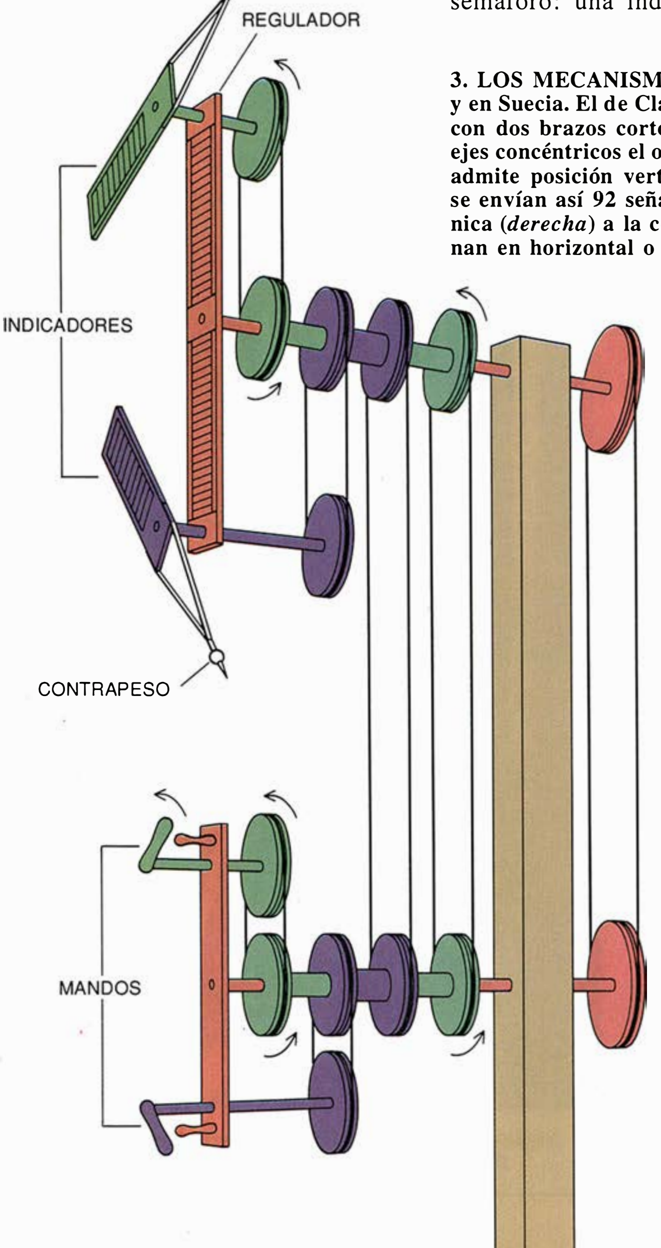
Para cambiar la técnica de señalización desde los relojes sincronizados a los semáforos, Chappe escogió primeramente una serie de señales sencillas basadas en una escritura abreviada corriente. Pronto vio que esta codificación no aprovechaba bien las combinaciones que permitía el semáforo de tres brazos, y que las transmisiones eran demasiado lentas.

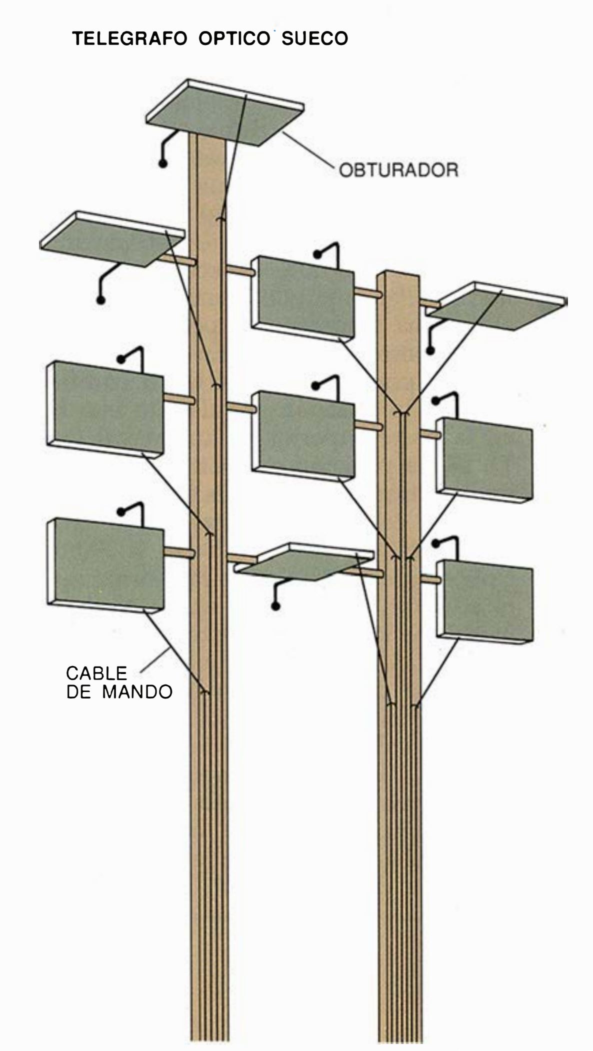
En 1795, antes de iniciar la segunda línea a Estrasburgo, Chappe decidió elaborar un nuevo código para el semáforo óptico. Se basaba en que tanto el regulador como los brazos indicadores podían hacerse girar de 45 en 45 grados. Cada indicador podía así adoptar ocho posiciones diferentes, y cuatro el regulador: en total, $8 \times 8 \times 4 = 256$ combinaciones posibles. Había empero que excluir aquellas en las que los indicadores se solapan con el regulador; esto reducía a siete el número de posiciones consideradas en cada indicador, y a 196 el número de combinaciones. Además, para mayor claridad, Chappe limitaba a dos (horizontal y vertical) las posiciones del regulador —lo cual dejaba las combinaciones en 98— y suprimía otras seis configuraciones que podían crear confusión. Quedaban, pues, 92 señales de código utilizables.

El tomo de código publicado por Chappe en 1795 contenía 92 páginas, cada una con 92 líneas. Esto permitía transmitir 8464 expresiones en clave (letras, números, palabras y frases) mediante un par de señales de semáforo: una indicaba la página y otra la línea. En la primera página figuraban las 92 claves más corrientes. Para acelerar el envío de señales, los operadores indicaban la primera página con un código abreviado —el “doble cierre”—, que consistía en replegar los brazos indicadores desde cualquier posición que tuviese el semáforo en la primera mitad del par de señales citado.

En 1799 Chappe amplía su código con dos tomos más; en ellos se recogían claves para nombres geográficos y palabras y frases de uso común, alcanzando un total de 25.392 expresiones. En el código se incorporaban claves para el paso de un tomo a otro, comparables a las señales de “inversión” que mucho después se utilizarían en telegrafía para el cambio de letras a cifras y viceversa.

Al iniciarse una comunicación se tardaba unos seis segundos en transmitir la primera señal en clave desde una estación hasta la siguiente, con lo cual sólo se requerían 12 minutos





3. LOS MECANISMOS DE SEÑALIZACION tomaron formas distintas en Francia y en Suecia. El de Claude Chappe (*izquierda*) consiste en un brazo largo, el regulador, con dos brazos cortos —indicadores— sujetos a sus extremos. Mediante correas y ejes concéntricos el operador puede controlar la posición de cada brazo. El regulador admite posición vertical y horizontal, y los indicadores giran de 45 en 45 grados: se envían así 92 señales diferentes. Abraham Edelcrantz prefirió la sencillez mecánica (*derecha*) a la compacidad. Su sistema utiliza 10 “obturadores” que se posicionan en horizontal o vertical, consiguiendo 1024 señales.

Los telégrafos ópticos españoles

También en nuestro país el telégrafo óptico vertebró una primitiva red de comunicaciones. Dan fe de ello las torretas en ruina que todavía coronan cerros y colinas por numerosos lugares de la península. En 1850 una larga cadena de torres podía hacer llegar mensajes desde Cádiz hasta Irún o hasta Barcelona por medios puramente ópticos. Y si bien es cierto que tal red, al nivel de las más avanzadas de Europa, nacía con cincuenta años de retraso, ello no puede achacarse a falta de esfuerzo y de ingenio sino al caos y desgobierno en que vivió este país durante gran parte del siglo pasado.

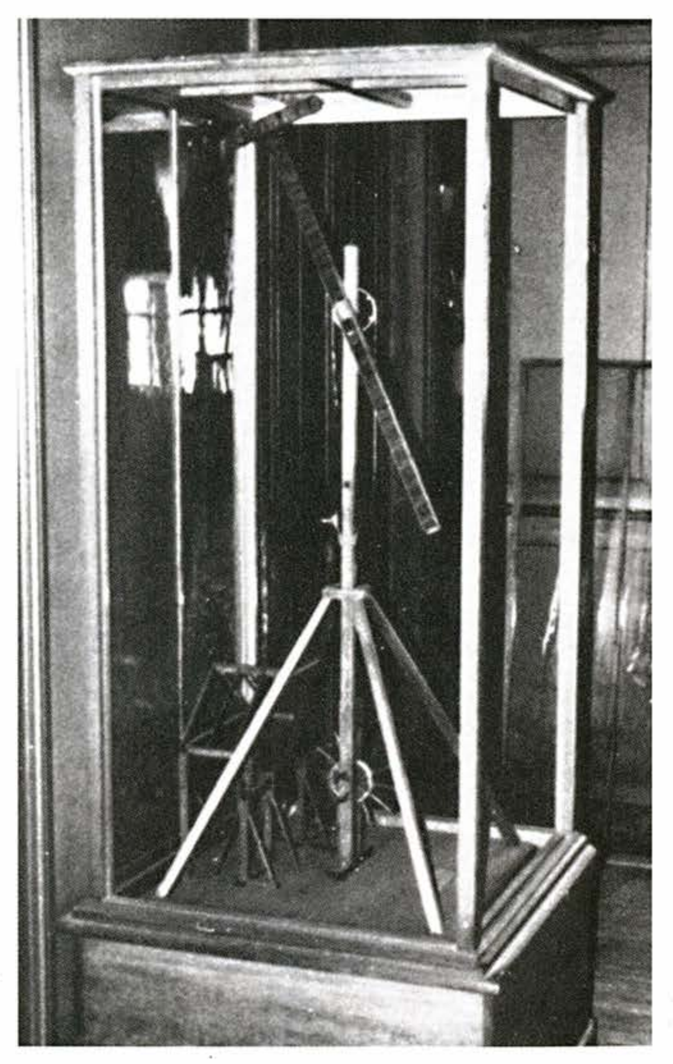
El verdadero iniciador del telégrafo óptico en España fue el científico canario Agustín de Betancourt, que disfrutó en Francia de una beca del rey Carlos III y mantuvo estrechas relaciones con las Academias de aquel país. En 1794 conoció y examinó con gran interés el invento de Chappe, así como el telégrafo que simultáneamente desarrollara el inglés Murray. El resultado fue la concepción de un sistema original de telegrafía óptica que sometió primeramente —de 1796 a 1798— al examen de la Academia de Ciencias francesa en abierta competición con el sistema de Chappe. Pese a los elogiosos informes de la Academia, la autoridad de Chappe vetó la introducción en Francia del sistema.

Betancourt regresó entonces a su patria, y aquí sí fue premiada su inventiva: Carlos IV dispuso en 1799 la construcción de una línea de telegrafía óptica entre Madrid y Cádiz. Tal línea comprendería unas 60 estaciones intermedias y, de haberse terminado a su tiempo, hubiese sido la segunda de Europa. El propio Betancourt había de dirigir la obra y fabricar los aparatos necesarios.

Sin embargo, parece que la línea no llegó a funcionar sino entre Madrid y Aranjuez, y más bien en plan experimental. La escasísima información disponible no permite especular sobre las causas del fracaso. Por supuesto serían de índole técnica, pues el sistema Betancourt superaba en no pocos aspectos a sus contemporáneos. En efecto, la transmisión de señales podía ser alfabética o codificada, y se basaba en la posición angular de una flecha montada en la parte superior de un mástil (a modo de una T). Dicha posición se controlaba mediante un torno, que al mismo tiempo hacía girar un catalejo (en la estación cabecera de línea) o dos catalejos (uno "a" hacia atrás y otro "b" hacia adelante, en las estaciones intermedias), de tal forma que mantuviera el paralelismo entre la citada flecha y un hilo diametral de la lente. De este modo, con un solo movimiento de manivela se aseguraba no solamente la recepción de la señal enviada por la estación precedente (identificada por la posición de la rueda del torno al colocar el hilo de la lente del catalejo "a" paralelo a la flecha de aquella estación), sino también la retransmisión automática de esa señal hacia la estación siguiente. En efecto, al mismo tiempo se posicionaba la flecha de la propia estación y el hilo del ocular del catalejo "b", lo que permitía comprobar la correcta recepción de la señal por la estación siguiente.

Otro ensayo de telegrafía semafórica, limitado al ámbito militar, fue el diseñado por el coronel Hurtado y que funcionó entre 1805 y 1820 en la bahía de Cádiz. Posteriormente (1830) el oficial de marina Juan José Lerena demostró un telégrafo óptico de su invención y estableció una nueva línea entre Madrid y Aranjuez, a la que seguirían otras entre Madrid y San Ildefonso (La Granja), Madrid y El Pardo, y finalmente Madrid-Valladolid, que sólo llegó hasta la Sierra de Guadarrama por corte de la asignación.

La convulsa historia de nuestro país entre 1808 y 1843 puso serias trabas a todo serio intento de progreso aplicable a la sociedad civil. Tuvo que llegar la mayoría de edad de Isabel II y la relativa calma del período siguiente para que finalmente se estableciera un sistema telegráfico nacional. Así, en 1844, un Real Decreto creaba y regulaba el servicio



Modelo del telégrafo óptico inventado por Agustín de Betancourt. (París, Conservatoire des Arts.)

de Telégrafos. Por aquellas fechas ya funcionaban telégrafos eléctricos en algunos países, y se daba por seguro que llegarían a prevalecer sobre los viejos sistemas ópticos. En España, no obstante, se decidió que la nueva red fuera óptica, muy probablemente por la mayor seguridad que ofrecía el sistema de torretas —en realidad, pequeñas fortalezas— ante los ataques de bandoleros y guerrilleros, y también porque la complicada orografía española dificultaba el tendido de líneas con postes y conductores. Por otro lado, la organización del servicio a través de la red óptica iba a servir como transición y entrenamiento para el telégrafo eléctrico, que se iniciaría en 1855.



Red española del telégrafo óptico en el siglo XIX

En sus principios, la telegrafía tuvo la finalidad primordial de mantener el orden público en todo el territorio español. Fue por lo tanto un eficaz instrumento del gobierno, y sólo mucho más tarde, ya en época del telégrafo eléctrico, se abriría al uso público. Su explotación se encomendó a la Dirección General de Caminos, Canales y Puertos, y posteriormente a la nueva Dirección General de Telégrafos, dentro del Ministerio de la Gobernación.

El coronel José María Mathé, diseñador de un sistema semafórico enteramente original, fue encargado de la construcción y gestión de la red óptica. La primera línea, Madrid-Irún (por Valladolid y Burgos), se puso en servicio en octubre de 1846. Comprendía 52 torres, y tenía su cabecera en el cuartel de Guardias de Corps (llamado luego del Conde Duque), en Madrid. A ésta siguieron otras dos líneas: la de Madrid a Barcelona por Valencia, y la de Madrid-Cádiz, con 59 torres, inaugurada en 1853. Con estas líneas entroncaban varios ramales (Cuenca, Badajoz, Zaragoza, etcétera).

Las torres del sistema de telegrafía óptica de Mathé ostentaban como dispositivo señalizador un bastidor con tres bandas oscuras paralelas, regularmente espaciadas. Por unas guías verticales situadas en el centro del bastidor se hacía ascender o descender una pieza móvil (el indicador), cuya posición determinaba la cifra de código transmitida (del cero al nueve) y, en su caso, las señales de repetición y de error. De modo análogo, a un costado del bastidor había una bola que se desplazaba verticalmente para señalizar incidencias del servicio, tales como averías, niebla, ausencia o cualquier evento que impidiera el debido funcionamiento. Cada torrero repetía la señal recibida de la estación anterior y se aseguraba de su correcta recepción por la estación siguiente.

Los mensajes telegráficos iban cifrados y las claves variaban periódicamente, dado el carácter reservado y exclusivamente oficial de las comunicaciones cursadas. Por ello los torreros solamente podían entender y verificar el preámbulo y el final de los "telegramas": la categoría del mensaje, la estación de origen y la de destino, la fecha y la hora, el número de registro y la extensión del texto en grupos de cifras de código.

Poco a poco, cundió entre las capas más ilustradas de la nación la idea de que el sistema óptico había perdido vigencia, y que había que reemplazarlo por el telégrafo eléctrico, no afectado por fenómenos meteorológicos tan frecuentes como la niebla o la intensa lluvia. Todo ello preparó el camino para la implantación oficial de la telegrafía eléctrica. Esta tuvo lugar en el año 1855, bajo la dirección del mismo José María Mathé, ya por entonces Brigadier y Director General del nuevo Cuerpo de Telégrafos. En 1857 se desmontó la última torre óptica, en la línea de Andalucía. Muy pronto de ellas sólo quedó el mudo recuerdo de unas piedras sobre las colinas, pero los torreros lograron ser reconvertidos a telegrafistas, y el telégrafo se popularizó, abriendo cauces para actividades privadas que harían progresar la sociedad española.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HISTORIA DE LA TELEGRAFÍA ÓPTICA EN ESPAÑA. Sebastián Olivé Roig. Secretaría General de Comunicaciones – Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid, 1990

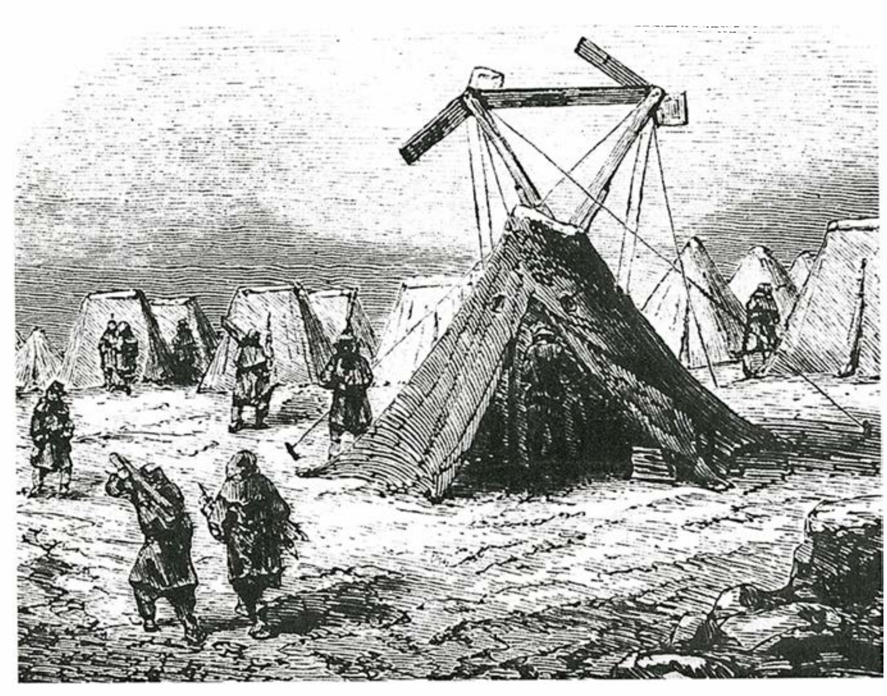
para el tránsito por las 120 estaciones que mediaban entre París y Toulon. Establecida la correspondencia continua entre ambas ciudades, el envío de la señal de estación a estación se hacía en no más de dos segundos, pero los operadores acostumbraban retener cada señal de 20 a 30 segundos para asegurar su buena recepción. Por consiguiente, sólo se recibían una o dos señales por minuto en el extremo de la línea.

Dado que cada señal expresaba una de las 25.392 palabras y frases del código, la transmisión de dos señales por minuto correspondía a una velocidad algo inferior a los 15 bits —con los que se codifican 32.768 combinaciones— por cada 30 segundos, o sea a 0,5 bit por segundo. Si se estima en 10 caracteres la longitud media de tales expresiones de código, ello equivaldría a una velocidad efectiva de 20 caracteres por minuto. Sorprende que esto resista muy bien la comparación con los primeros telégrafos electromagnéticos, entre ellos el de aguja, patentado por William Fothergill Cooke y Charles Wheatstone en 1837, que transmitía a unos 25 caracteres por minuto. El primer sistema que consiguió mayor rapidez fue el telégrafo automático de Wheatstone de 1858, el cual mediante lectores de cinta de papel perforada alcanzaba velocidades de hasta 2000 caracteres por minuto.

Mientras Chappe arrostraba los furores de la Revolución para construir la red telegráfica francesa, cientos de kilómetros al norte alguien se esforzaba por abrirse camino en medio de un clima de asesinatos e intrigas palaciegas. El 29 de julio de 1754 nace Abraham Niclas Clewberg (luego llamado Abraham Edelcrantz) en la ciudad sueca de Åbo, hoy finlandesa. Aventajado y de familia relativamente pudiente, antes de los 19 años ha escrito ya dos tesis doctorales, una sobre óptica y la otra sobre literatura, y a continuación imparte cursos de electricidad y literatura en la Academia Real de Åbo. El rey Gustavo III le oye recitar poemas en 1775, y queda tan impresionado que le invita a visitar la corte en Estocolmo.

En 1783 Clewberg fija su residencia en Estocolmo, y antes de tres años ingresa con todos los honores en la Academia Sueca de Artes y Letras. En 1787 el rey le nombra secretario privado, y dos años más tarde, a los 35 de edad, recibe carta de nobleza y cambia su apellido por Edelcrantz. Al ser asesinado Gustavo III en 1792, comienzan las persecuciones de todos los que habían rodeado al monarca. Sin embargo, Edelcrantz consigue salir airoso y evitar la cárcel o el exilio que sufrirían muchos de sus amigos.

En 1794 las noticias del telégrafo francés corren por toda Europa. Ciertamente no se disponía de suficiente información; los relatos eran escasos y provenían de viajeros que apenas habían entrevisto las torres ópticas o leído algún periódico. Pero Edelcrantz se entusiasma con la idea y empieza a desarrollar un sistema propio; el 1 de noviembre de 1794 expone un prototipo ante el rey Gustavo IV, que en esa fecha cumple 14 años.



4. EL TELEGRAFO MOVIL tuvo aplicación en la campaña de Rusia el año 1812. Abraham Chappe lo diseñó por encargo de Napoleón.

El primer diseño de Edelcrantz es análogo al de Chappe: un travesaño de soporte único con dos indicadores giratorios. Cada indicador admite cuatro posiciones diferentes, lo que da un total de 16 combinaciones. Con ellas puede representarse un alfabeto reducido aunque de utilidad práctica.

En la prueba inicial intervienen tres estaciones: la primera en los tejados del Palacio Real de Estocolmo, la segunda a unos cinco kilómetros en las afueras de la ciudad y la tercera en los terrenos del Palacio Real de Drottningholm, siete kilómetros más allá. Una semana después, el joven rey pide a su Consejo Privado que estudie la construcción de una red de telegrafía óptica, extendida hasta Dinamarca y Finlandia. Asimismo nombra miembro del Consejo a Edelcrantz, con lo cual prácticamente impone una decisión positiva.

El 30 de enero de 1795 Edelcrantz acomete la construcción de su primera línea telegráfica, que entrará en funcionamiento el 28 de julio uniendo la iglesia de Katarina, en el centro de Estocolmo, con la fortaleza de Vaxholm, a unos 35 kilómetros. Dos líneas más se construyen entre 1795 y 1797: de Estocolmo a Fredricsborg y de Grisslehamn a Signilsskär y Eckerö, en la isla de Åland. Por aquel tiempo Edelcrantz ha desechado ya el semáforo y ha concebido un nuevo telégrafo, que consiste en una matriz de nueve obturadores con uno más montado en la parte superior. Abriendo o cerrando cada obturador independientemente, el operador puede transmitir $2^{10} = 1024$ señales diferentes.

En 1801 los telegrafistas suecos construyen otra línea importante hasta Hälsingborg, puerto limítrofe con Dinamarca. Se pretendía así enlazar la red de telegrafía óptica sueca con una incipiente red danesa. Pero cuando la escuadra inglesa ataca Dinamarca a los tres días de abrirse la comunicación, los mandos navales suecos no responden a una petición telegráfica de auxilio, y Copenhague sufre el bombardeo británico. Como puede imaginarse, los daneses pierden interés por la conexión y la línea telegráfica se arrincona.

Esta temprana demostración de que el valor de la tecnología depende del uso que se haga de ella, no empaña en absoluto el prestigio de Edelcrantz. En 1796 expone sus trabajos en el libro *Tratado de Telegrafía*, pronto traducido al alemán y al francés, lo

que le abre las puertas de la Academia Sueca de Ciencias. En la primavera de 1808 se crea la Real Institución Sueca de Telégrafos, y se le nombra primer director de la misma.

Edelcrantz aprovecha la ocasión para revisar su sistema de codificación, y elabora una nueva versión con 5120 señales. Además, las 13 tablas del sistema ampliado permitían introducir ciertas órdenes administrativas, como las que sancionaban a los operadores negligentes.

Las nuevas tablas aportaban también en la señal 636 una divisa para el Cuerpo de Telégrafos: *Passa väl upp* (Estad vigilantes). Destacaba esta señal en el sello de la Institución telegráfica y en los botones del uniforme de los operadores, en permanente recuerdo de su deber.

En noviembre de 1809 la red sueca comprendía alrededor de 50 estaciones que abarcaban una distancia aproximada de 200 kilómetros y daban empleo a 172 personas. Enlazaba Estocolmo con Gävle hacia el norte, Landsort hacia el sur y Eckerö (en Åland) hacia el este. Sin embargo, poco después Gustavo IV entabló una desastrosa guerra con Rusia, en la que Suecia perdió Finlandia y él la corona. La red telegráfica se desmantela y tarda más de una generación en ser reconstruida. A la muerte de Edelcrantz, en 1821, todavía se ven en ruinas las torres que él construyera.



5. UNIFORME DEL OPERADOR de telégrafo aprobado por Carl XIV Johan de Suecia en 1809. El botón del uniforme (*en recuadro*) muestra la divisa de la Institución, la señal 636: "Estad vigilantes".

Hasta mediados de 1836 no entran en servicio las nuevas líneas de telégrafo óptico, de Estocolmo a Vaxholm y a Sandhamn. En 1838 la red alcanza ya una extensión semejante a la que antes tuviera. Su última ampliación acontece en 1854, cuando se prolonga la línea de Furusund hasta Arholma y Söderarm.

Hacia 1840, en casi todos los países europeos hay por lo menos una o dos líneas de telegrafía óptica en servicio. En Inglaterra, entre 1796 y 1816, el Almirantazgo explota líneas de Londres a Portsmouth, a Plymouth, a Yarmouth y a Deal. En Alemania, a partir de 1832 una línea enlaza Berlín con Coblenza, pasando por Potsdam, Magdeburgo, Colonia y Bonn. Otras líneas transportan mensajes de Hamburgo a Altona y Cuxhaven, y de Bremen a Bremerhaven. Rusia entra en la liza con cierto retraso, pero a lo grande: el 8 de abril de 1839 se abre una línea con 220 estaciones de semáforo, entre San Petersburgo y Varsovia. Las líneas de telégrafo óptico cubren también algunas regiones de los Estados Unidos.

Pero la época dorada de las redes de telegrafía óptica contempla también las primeras incursiones de su competidor electromagnético. En 1837 Inglaterra y Estados Unidos empiezan a pasar del sistema de torres y catalejos al de hilo de cobre y manipulador telegráfico.

Los países donde hay redes ópticas establecidas no aprecian inmediatamente la mejora que aportaría tal cambio. Así, la red de telegrafía óptica francesa había de resistirse al cambio casi diez años. Hasta 1846 no hay un primer telégrafo electromagnético que reemplace la histórica línea de París a Lille; para transmitir las señales utiliza un curioso dispositivo original de Alphonse Foy y Abraham Louis Breguet, que reproduce las posiciones del semáforo de Chappe. La red óptica llega a su culminación en 1852: 556 estaciones jalonan 4800 kilómetros de líneas que unen París con 29 ciudades francesas. En cada estación trabajan por turnos hasta seis operadores, lo que supone más de 3000 operadores en total.

En Suecia, la sustitución del telégrafo óptico se inicia más tarde todavía. Durante más de diez años coexisten estaciones ópticas y eléctricas en funcionamiento; los telégrafos ópticos alcanzan lugares en principio no accesibles por cables eléctricos. En 1864 son ya 174 las estaciones de telégrafo electromagnético, atendidas por 250 operadores, mientras subsisten 24 estaciones del sistema óptico en manos de 66 operadores. El desmonte en 1881 de las tres últimas estaciones de telégrafo óptico marca en Suecia el final de una era.

Un olvido casi total envuelve los logros de Claude Chappe y Abraham Edelcrantz, sepultados bajo innovaciones técnicas que ellos nunca pudieron imaginar. Pero es indiscutible que ambos fueron precursores de las redes de transmisión de datos, resolviendo multitud de problemas para que pudieran transmitirse mensajes con regularidad a través de largas cadenas de estaciones telegráficas. Mirando hacia atrás, sorprende comprobar que algunas de sus ideas hayan sido ahora recuperadas por los diseñadores de los modernos protocolos digitales. En efecto, no se limitaron a concebir ingeniosos métodos para la compactación de datos, la corrección de los errores e incluso el cifrado de la información, sino que además los pusieron en práctica.

Lo que caracterizó a estos dos inventores no fue su buena estrella sino su clarividencia e incansable dedicación al objetivo propuesto, aun en circunstancias adversas. Y no fueron las dificultades técnicas las que más costó superar. Como dice Edelcrantz en su *Tratado*, "a menudo ocurre con las nuevas invenciones que una parte del público general las encuentra inútiles y otra parte las cree imposibles. Cuando ya no pueden negarse la posibilidad ni la utilidad, la mayoría admite que aquello era muy fácil de descubrir y que todos lo conocían desde siempre".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A HISTORY OF TACTICAL COMMUNICATION TECHNIQUES. David L. Wood. Ayer Company Publications, 1974

THE OLD TELEGRAPHS. George Wilson. Phillimore Chichester, 1976.

LA TÉLÉGRAPHIE CHAPPE. Fédération Nationale des Associations de Personnel des Postes et Télécommunications pour la Recherche Historique. Editiones de l'Est, Nancy, 1993.

THE EARLY HISTORY OF DATA NETWORKS. Gerard J. Holzmann y Björn Pehrson (*en prensa*).

Activación de precursores de proteínas

Muchas proteínas que desarrollan una función biológica importante se activan, en el momento en que se precisa su intervención, mediante proteolisis controlada de algunos de los enlaces peptídicos de sus precursores

Francesc X. Avilés, Alicia Guasch y Josep Vendrell

La vida de los seres depende en buena parte de la acción de las proteínas, sus biomoléculas más versátiles. La expresión del mensaje genético contenido en los ácidos nucleicos se realiza, sobre todo, a través de las proteínas; a saber: mediante enzimas que facilitan la replicación y transcripción del ADN; enzimas que promueven la obtención de energía y la síntesis de otras biomoléculas; proteínas transportadoras; proteínas estructurales y reguladoras; proteínas reparadoras y proteínas destructoras, entre otras.

Las proteínas, y entre ellas las enzimas, se forman a partir de veinte aminoácidos distintos. La combinación de éstos en largas cadenas, con centenares de unidades cada una, posibilita la formación de millares de proteínas diferentes, adaptadas a los diversos procesos biológicos.

Los organismos se valen del control de la actividad de esta multitud de proteínas para cumplir sus propias funciones. Pero, ¿cómo poder controlar específica y particularmente tal cantidad de proteínas distintas? La respuesta constituye el cuerpo del artículo.

Los mecanismos de control de la actividad proteica han ido perfeccionándose a lo largo de la evolución. En ese camino, han adoptado diversas formas: control genético de la cantidad de proteína sintetizada, control directo de su actividad mediante substancias como substratos o inhibidores que se unen a sus centros activos (que son las regiones de la molécula donde se lleva a cabo su acción biológica), o control indirecto de su actividad por unión de substancias fuera de su centro activo (regulación alostérica). Dicho control también puede efectuarse por modificación química de aminoácidos implicados en el plegamiento espacial de la proteína o en su funcionamiento.

FRANCESC X. AVILES, ALICIA GUASCH y JOSEP VENDRELL trabajan en el departamento de bioquímica de la facultad de ciencias de la Universidad Autónoma de Barcelona. Avilés, catedrático de bioquímica, dirige, además, el Instituto de Biología Fundamental. Inició su formación en la Universidad de Granada, doctorándose en química por la Autónoma de Barcelona en 1975. Guasch y Vendrell completaron su formación postdoctoral en Munich y Zurich, respectivamente.

Estas formas de control suelen ser reversibles, lo que significa que el proceso se inicia y cesa, para volver a iterarse, cuantas veces sea preciso a lo largo de la vida de la proteína. El control es irreversible cuando se produce una degradación parcial de la proteína, acometida por unas enzimas denominadas proteasas. A este proceso de degradación parcial lo llamamos proteolisis limitada.

Los mecanismos de control reversible se caracterizan por su universalidad: la actividad biológica de prácticamente todas las proteínas resulta afectada por uno o varios de ellos al mismo tiempo. En cambio, los mecanismos de control irreversible suelen presentar una distribución más restringida, estando dedicados a proteínas que poseen una acción biológica muy potente o de especial riesgo para su entorno (enzimas degradadoras, neuropéptidos, hormonas y otras), para las que es necesario un control de su actividad hasta alcanzar el lugar de destino y hasta el momento apropiado. Estas proteínas se sintetizan, por lo común, en forma de precursores inactivos con una extensión peptídica que bloquea su funcionalidad, extensión que es eliminada o modificada por proteolisis limitada cuando son activadas.

Otras veces, la degradación limitada de proteínas tiene relación con los procesos encargados de dirigir las proteínas recién sintetizadas hacia su definitiva ubicación intracelular o extracelular. Este es el caso de los segmentos "pre", secuencias aminoterminales adicionales con las que se sintetizan las proteínas que deben ser secretadas fuera de la célula o que tienen su destino en membranas o en orgánulos celulares. Los segmentos en cuestión conducen la proteína hasta su asiento final, cumplido lo cual son eliminados por proteolisis limitada.

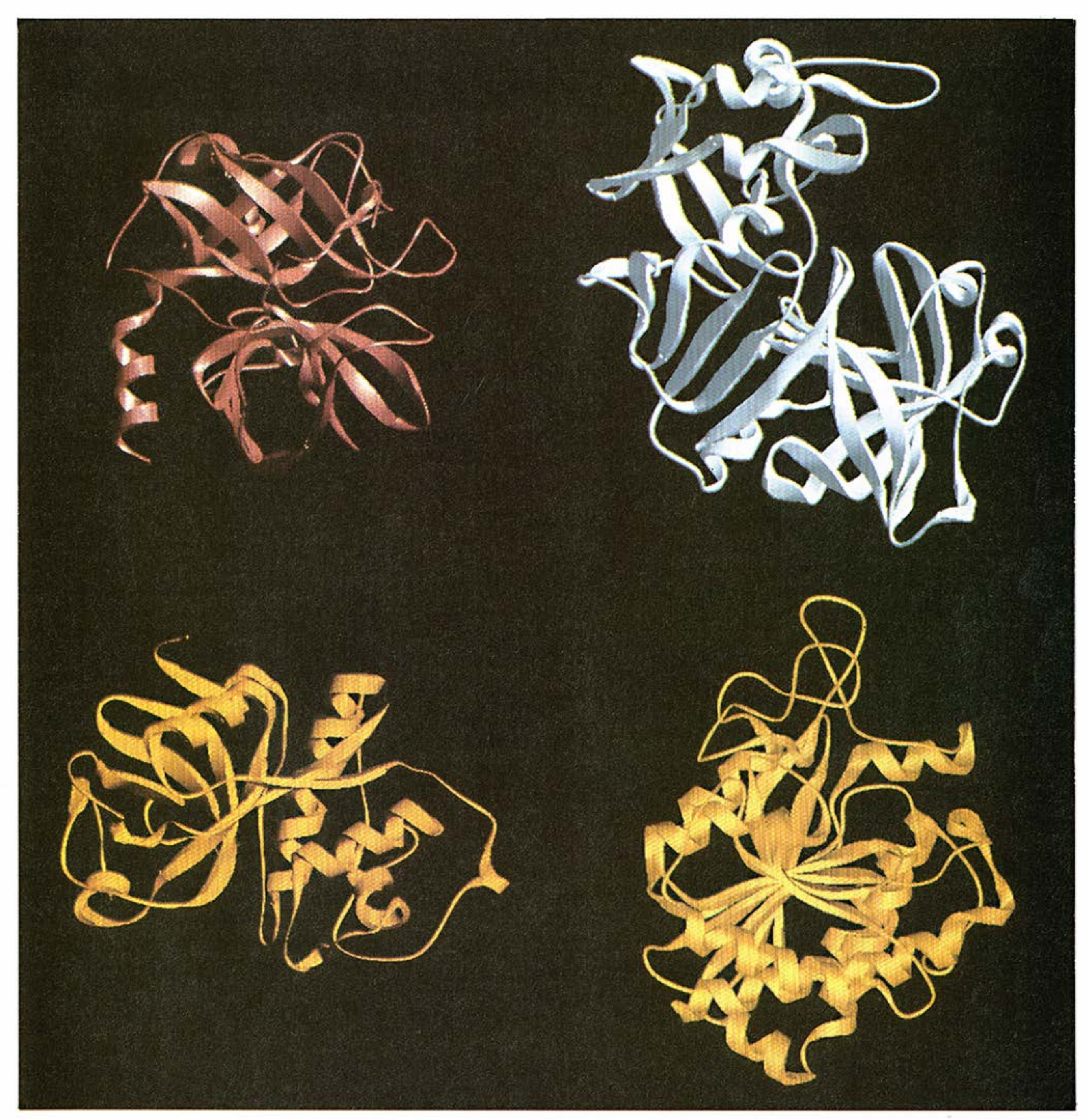
Además de la degradación limitada, debemos considerar la degradación total que sufren todas las proteínas al final de su vida. Gracias a este mecanismo de control irreversible se ajusta la concentración de proteínas en tejidos y fluidos biológicos mediante el equilibrio entre degradación y síntesis. Ello permite, además, su renovación constante, eliminando las afectadas por procesos de envejecimiento.

Las moléculas responsables de los mecanismos de control de la actividad proteica por degradación irreversible son las proteasas, enzimas de gran rendimiento catalítico, es decir, capaces de catalizar a gran velocidad reacciones hidrolíticas en las cadenas polipeptídicas de las proteínas substrato. La acción proteolítica de estas enzimas se halla controlada, a su vez, por inhibidores, cuyo efecto es el de impedir que su acción degradativa se lleve a cabo o se extienda. Y, al ser las proteasas moléculas peligrosas para su entorno, se suelen sintetizar en forma de precursores inactivos, las proproteasas o zimógenos.

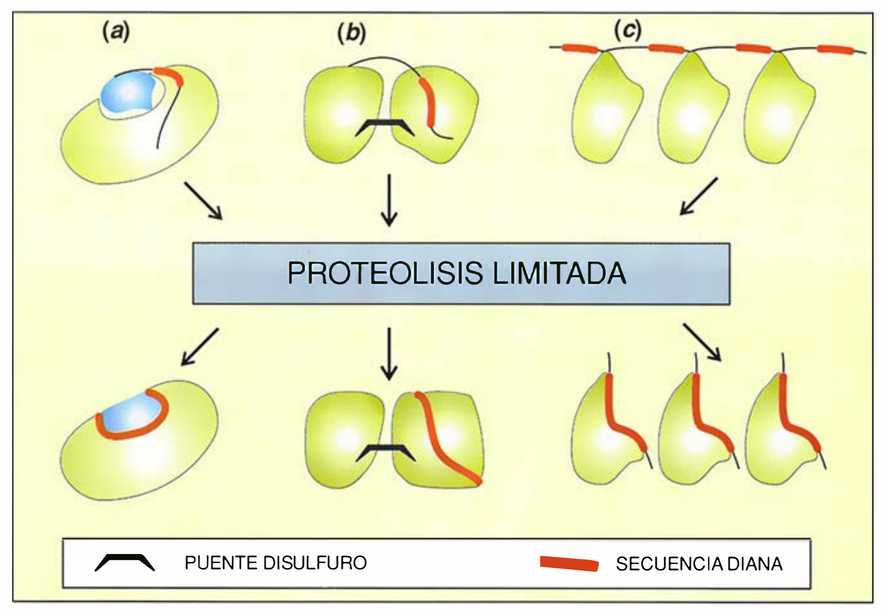
El estudio de las proteasas y de sus precursores está facilitando una mejor comprensión de los procesos de regulación por proteolisis limitada, así como de los mecanismos de inhibición y activación de precurso-

res inactivos en general. Se conoce bastante bien la bioquímica de las proteasas, su estructura tridimensional y mecanismo de actuación, contándose entre las primeras enzimas que se cristalizaron.

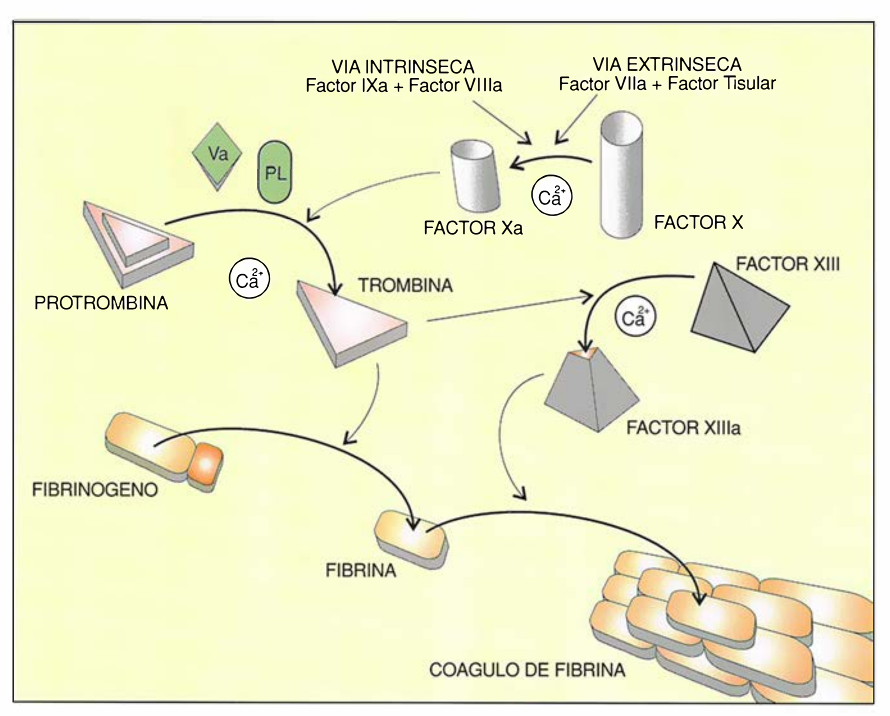
A tenor del aminoácido o metal que posean en su centro activo, podemos clasificar las proteasas en cuatro familias: serinaproteasas, asparticoproteasas, cisteinaproteasas y metaloproteasas. Pertenecen a la primera familia varias enzimas digestivas, como la tripsina, la quimotripsina y la elastasa. Las tres se caracterizan por constar de dos barriles beta entre los que se encuentra el centro activo, donde hay un aminoácido serina indispensable para su acción catalítica. Los barriles beta deben su nombre a que la cadena polipeptídica adopta una estructura extendida y ondulada (estructura beta) que se repliega en segmentos antiparalelos que adoptan la forma



1. FAMILIAS DE PROTEASAS. En primer lugar se ilustra el esqueleto polipeptídico de la serinaproteasa elastasa (*arriba, a la izquierda*). Consta de dos dominios estructurales, en cuya interfase se encuentra el centro activo, formado por aminoácidos pertenecientes a los dos dominios. A su derecha aparece el esqueleto polipeptídico de la asparticoproteasa pepsina, formada también por dos dominios estructurales. La estructura de la pepsina es cuasisimétrica con respecto a un eje que cruzaría el dibujo diagonalmente a partir del vértice superior derecho. El esqueleto polipeptídico de la cisteinaproteasa papaína (*abajo a la izquierda*) se pliega en dos dominios, uno de los cuales adopta preferentemente una estructura en cintas beta (*izquierda*), mientras que el otro adopta preferentemente un plegamiento en hélice alfa (*derecha*). Por último, se ofrece el esqueleto polipeptídico de la metaloproteasa carboxipeptidasa A (*abajo a la derecha*). Un haz de cintas beta (hoja beta) forma el corazón de la molécula, mientras que una serie de hélices alfa y regiones de estructuración no regular se empaquetan sobre ella. En un surco entre dichas estructuras secundarias se dispone su centro activo y en su interior un átomo de metal, el Zn^{2+}, esencial para su actividad.



2. ACTIVACION DE PROPROTEINAS por proteolisis limitada. La diana de activación suele encontrarse en la región aminoterminal de las proproteínas, o bien entre zonas de plegamiento globular. La conformación laxa y accesible de la zona diana y, en muchos casos, la presencia de una secuencia determinada de aminoácidos en la misma, permite su reconocimiento específico y la acción hidrolítica de la proteasa activante. Los tres ejemplos de activación de este esquema hacen referencia a lo observado en los casos de los zimógenos digestivos (*a*), los factores de coagulación de la sangre (*b*) y las poliproteínas precursoras de las cápsides de virus (*c*).



3. CASCADA PROTEOLITICA de coagulación de la sangre, ilustrada en sus últimos estadios. En la formación de los coágulos de fibrina que taponan heridas en vasos sanguíneos intervienen más de una docena de factores de coagulación (de los que aquí sólo resaltamos los cuatro últimos). Al menos siete de ellos son proproteasas que se activan secuencialmente por eliminación de secuencias aminoterminales (como es el caso de la protrombina) o de secuencias centrales localizadas entre regiones globulares. La disposición en cascada permite multiplicar extraordinariamente el efecto inicial, así como la existencia de vías concurrentes y de vías que actúan por retroalimentación. La presencia de iones Ca^{2+} y de fosfolípidos (PL, suministrados por las membranas de plaquetas sanguíneas) es indispensable para potenciar diversos pasos de la cascada. El factor XIIIa, una transamidasa, termina el proceso estabilizando el coágulo mediante la formación de enlaces covalentes entre moléculas de fibrina. Deficiencias o mutaciones en los factores VIII o XIII dan lugar a trastornos en la coagulación, enfermedad que recibe el nombre de hemofilia.

de un barril. Las serinaproteasas intervienen en la coagulación sanguínea, defensa inmunitaria y fecundación, entre otras funciones.

La segunda familia está representada por la pepsina gástrica, proteína que consta de dos regiones globulares o dominios similares, formados esencialmente por cadenas beta, y asociados en forma de "croissant", entre los cuales discurre una amplio surco que contiene el centro activo. El aminoácido esencial es, aquí, un aspártico. En este mismo grupo de proteasas se inscribe la quimosina, responsable de la coagulación gástrica de la leche en mamíferos neonatos, y la renina, enzima que circula por el torrente sanguíneo y activa la angiotensina, hormona que controla la presión arterial y el balance de electrolitos.

La tercera familia, la de las cisteinaproteasas, encuentra en la papaína uno de sus miembros más representativos; se extrae de la papaya. La estructura de la papaína contiene dos dominios abrazados, lo que le sirve de protección contra la autólisis, con un aminoácido cisteína no oxidado en su centro activo. Diversas catepsinas, mayoritarias en los lisosomas (orgánulos celulares en donde se degradan proteínas), son cisteinaproteasas. Se ha observado la participación de cisteinaproteasas en la replicación y acción de parásitos y virus, así como en procesos patológicos, tales como distrofia muscular, osteoporosis e invasividad tumoral.

Por último, los componentes de la heterogénea familia de las metaloproteasas poseen un metal, zinc por lo común, en su centro activo. Sus cadenas polipeptídicas presentan plegamientos tridimensionales muy diversos. Pertenecen a esta familia las carboxipeptidasas digestivas y tisulares y algunas aminopeptidasas, así como las metaloendopeptidasas. Las últimas citadas, entre las cuales destacan las colagenasas, intervienen en la degradación del tejido conjuntivo y revisten interés en patologías reumatoides y en invasión tumoral.

¿Comparten las cuatro familias algún rasgo en el mecanismo que siguen para controlar la actividad de las proteínas? Sí, y consiste en que las proteínas susceptibles de regulación por proteolisis limitada suelen sintetizarse en la forma de proproteína, es decir, como precursor inactivo.

La acción de la proteasa sobre la proproteína provoca la ruptura de uno o varios enlaces peptídicos, generando la forma activa de la proteína. En unos pocos casos, sin embargo, esa proteolisis limitada no actúa como

generadora de la actividad de la proteína substrato, sino que produce un cambio en su funcionalidad.

La proteolisis limitada suele restringirse a determinadas regiones de la proteína localizadas frecuentemente en el extremo aminoterminal de su secuencia de aminoácidos o entre dominios globulares. Esas regiones presentan un plegamiento espacial laxo para facilitar la acción proteolítica y, a veces, una secuencia de aminoácidos que ha de ser reconocida por la proteasa activante. Cuando los péptidos escindidos de la proproteína pertenecen a una zona interna, la proteína activa queda, de ordinario, separada en dos o más trozos o cadenas polipeptídicas, que no se sueltan del todo, sino que permanecen unidas a través de puentes disulfuro. Este sería el caso de la insulina, hormona cuya deficiencia provoca la diabetes: se sintetiza en forma de una sola cadena, la proinsulina, y se convierte en dos, *A* y *B*, al ser activada por proteolisis limitada y perder un trozo central, cadena *C*. Ocurre así también en numerosas proproteínas implicadas en la coagulación sanguínea.

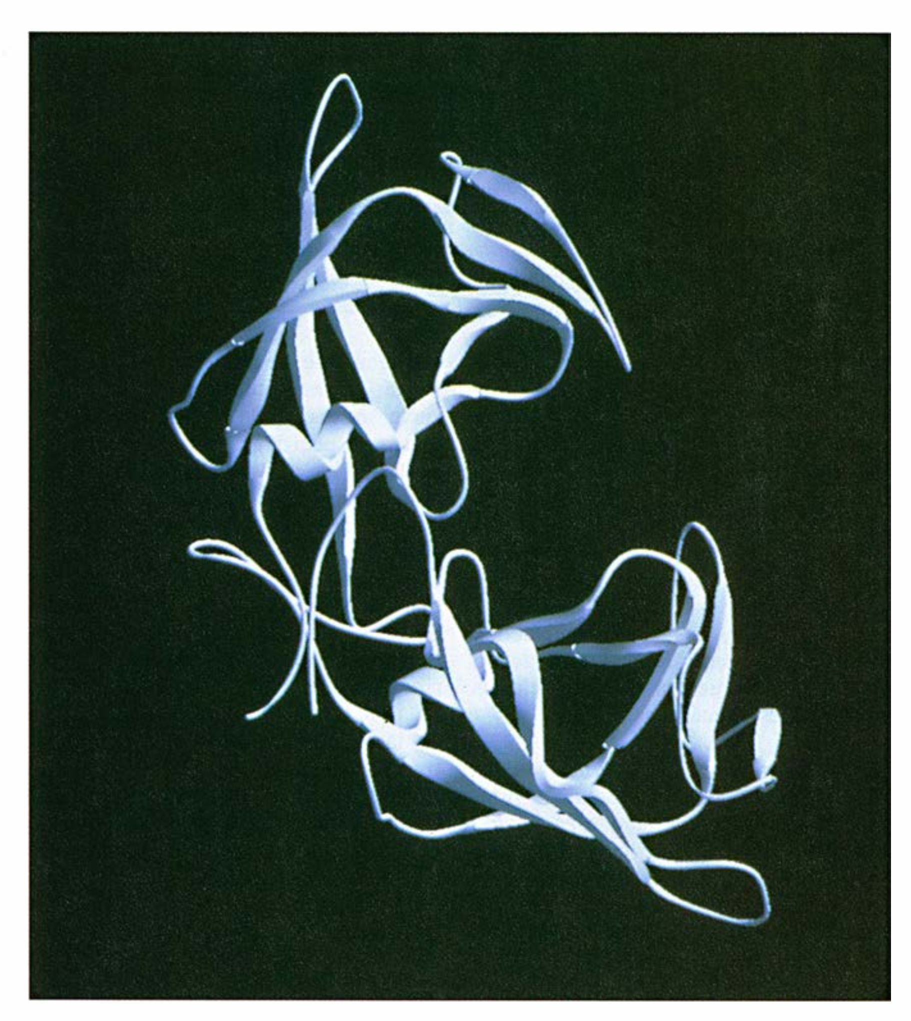
Las proproteínas pierden uno o varios péptidos en la proteolisis. La naturaleza tiende a ahorrar la pérdida de grandes regiones proteicas que son de síntesis costosa. En alguna ocasión, sin embargo, los péptidos o fragmentos de activación eliminados pueden superar, en tamaño, a la propia proteína activa. Nos referimos, por ejemplo, a la protrombina y al plasminógeno, proteínas sanguíneas que pierden, respectivamente, 274 y 560 aminoácidos de sus 582 y 791 iniciales.

Las proteínas de la coagulación sanguínea nos sirven de modelo para comentar la cascada de activación. En virtud de este fenómeno, característico de los sistemas regulados por proteolisis limitada, varios precursores inactivos de proteasas se activan consecutivamente de forma específica, multiplicando así la acción inicial de unas pocas moléculas. A modo de ejemplo, el fibrinógeno, para cumplir su misión formadora de coágulos que taponen las heridas, debe transformarse proteolíticamente en fibrina; a esa transformación le precede una cascada de activación muy compleja en la que intervienen, por lo menos, una docena de factores, muchos de los cuales son proproteasas que se activan en un orden secuencial. La existencia de esa cascada de coagulación permite que la activación de unas pocas moléculas de factores iniciales en el momento de producirse la herida (procalicreína, factor XII, factor VII, etcétera) engendre miles de moléculas de fibrina.

La proteolisis limitada opera cambios en la estructura tridimensional y en la funcionalidad de las proteínas. Sírvanos de muestra los zimógenos, o precursores inactivos, de proteasas digestivas. Por estudios comparativos de difracción de rayos X de cristales de serinaproteasas (tripsina y quimotripsina) y de sus zimógenos (tripsinógeno y quimotripsinógeno) se sabe que la proteolisis limitada da lugar a la rigidez y definición del centro activo, es decir, crea el ambiente espacial adecuado para los aminoácidos implicados en la catálisis y sitúa los aminoácidos de la enzima que fijarán específicamente el substrato de la reacción. La investigación llevada a cabo en el laboratorio de H. Neurath y K. Walsh, de la Universidad de Washington, y en el Instituto Max Planck de Munich por R. Huber y W. Bode, ha resultado de gran importancia en el conocimiento de estos sistemas.

Se conocen peor los cambios estructurales y de función de los zimógenos de proteasas reguladoras, como las implicadas en la coagulación de la sangre o en la transformación proteolítica de la acetilcolinoesterasa, enzima que hidroliza la acetilcolina después de que ésta haya realizado su acción neurotransmisora. La acetilcolinoesterasa sufre una proteolisis limitada que la escinde en dos fragmentos con actividad tripsina y carboxipeptidasa, respectivamente. No se conoce la función de las proteasas generadas, aunque se ha sugerido su participación en procesos de proliferación y crecimiento neuronal.

Son numerosos los sistemas proteicos regulados por digestión proteolítica limitada. Gracias a investigacio-



4. PROTEASA del retrovirus del sarcoma de Rous. La enzima se encuentra plegada esencialmente en estructura beta y, después, por asociación de dos de sus unidades integrando un dímero. En la forma dimérica, su conformación presenta notables homologías con asparticoproteasas (tales como pepsina o quimosina, de estructura monomérica pero de longitud doble), en cuya familia se puede clasificar. En el interior de la boca de dicha estructura se encuentra su centro activo, en el que destacan los aminoácidos aspártico 25, treonina 26 y glicina 27, muy bien conservados en otros miembros de la misma familia.

FUNCION BIOLOGICA	FAMILIA DE PROPROTEINAS O FENOMENO CONCRETO AFECTADO	EJEMPLOS DE PROPROTEINAS INVOLUCRADAS O DE SU ACTIVADOR
Transporte proteico	Proproteínas	La mayoría de las proteínas de segregación celular externa o de localización en membranas o en orgánulos celulares (muchas de ellas pre-proproteínas)
Estructuración celular y tisular	Ensamblaje del tejido conectivo Modelado del citoesqueleto y aparato contráctil y Proteolisis limitada de proteínas unidas a membranas	Procolágeno, proelastina Precursor de la proteinasa dependiente de Ca (CANP o calpaína). Proteasas de membranas de microorganismos
Comunicación intercelular y regulación metabólica	Prohormonas y productos vasoconstrictores Proneuropéptidos Proenzimas	Proinsulina, proglucagón, quininógeno, angiotensinógeno Proopiomelanocortina Protirosinasa, prefelenooxidasa
Control del desarrollo celular y de la fecundación	Metamorfosis de anfibios y regeneración uterina Crecimiento neural (y tisular, en general) Precursores de factores de crecimiento Oncogénesis Reumatismo Replicación vírica Formación de esporas Fecundación	Procolagenasa Acetilcolinoesterasa → proteasa Precursor del factor de crecimiento nervioso Estromielisina, activador del plasminógeno Metaloendopeptidasas Poliproteína precursora de la proteasa VIH-1 del sida Proteasas A y B de levaduras Proacrosina
Defensa	Coagulación sanguínea Sistema inmunitario/sistema complemento Sistema inmunitario/mastocitos-anafilaxis local Venenos	Factores de coagulación (XII, XI, IX, X, etc.) Complejo oligomérico C1 del sistema complemento Serina y metaloproproteasas de mastocitos Prometilina de abejas
Degradación y recambio proteico	Sistema digestivo de vertebrados Degradación intracelular	Pepsinógeno, tripsinógenos, procarboxipeptidasas, etc. Precursores de proteasas de membranas

nes sobre el ADN de genes que codifican proteínas sabemos que es frecuente que se sinteticen con regiones extra, y que esas regiones extra van desapareciendo durante los procesos de transporte y maduración de las proteínas. Así ocurre en el colágeno del tejido conjuntivo; esta proteína sufre, durante su maduración, la degradación de sus extremos globulares una vez se han ensamblado en hélice las regiones centrales de tres de su moléculas, estructura que explica sus propiedades mecánicas.

Enumerar todos los sistemas en los que interviene la proteolisis limitada requeriría demasiado espacio. No obstante, no deberíamos dejar de mencionar que la proteolisis limitada interviene también en el desarrollo celular, la fecundación, la transmisión de señales hormonales y nerviosas o en los mecanismos de defensa inmunitaria, por citar los más notorios.

Dijimos antes que el segmento "pre" era una secuencia aminoterminal que ciertas proteínas poseen, responsable en muchos casos de su destino celular. Este segmento, de 16 a 26 aminoácidos de longitud en células eucariotas, es la primera parte de la proteína que se sintetiza en el ribosoma; esta secuencia señalizadora suele ser escindida por acción de proteasas específicas, una vez que la proteína ha atravesado la membrana del retículo endoplasmático o del orgánulo celular al que va destinada.

Desde que en 1970 D. Sabatini y G. Blobel, entonces en la Universidad de Yale, propusieron la hipótesis de la secuencia señal según la cual la señal responsable de la unión de los ribosomas al retículo endoplasmático (y por tanto del inicio del tránsito de las proteínas hacia su destino extracitoplasmático) es una secuencia situada en el extremo aminoterminal de la cadena polipeptídica naciente, se han caracterizado multitud de segmentos "pre" en proteínas, lo mismo en eucariotas que en procariotas. Muchas proproteínas son también preproproteínas; en particular, todos los zimógenos digestivos y proproteasas de fluidos biológicos, así como prohormonas (proinsulina) y protoxinas (promelitina).

Las proteasas cumplen también una función destacada en la replicación vírica. En retrovirus (el del sida incluido), rinovirus (el del catarro común entre ellos), enterovirus (por ejemplo, los de la polio y de la hepatitis A), y en diversos virus de plantas, se ha demostrado que las proteínas de la cápside se sintetizan en forma de poliproteínas precursoras y que, antes de su ensamblaje, deben escindirse en sus unidades mediante degradación limitada a cargo de proteasas. En los virus la proteasa está ya incluida en la larga cadena de una poliproteína precursora. La acción autocatalítica de la proteasa favorece su liberación al medio y la escisión de las demás unidades proteicas.

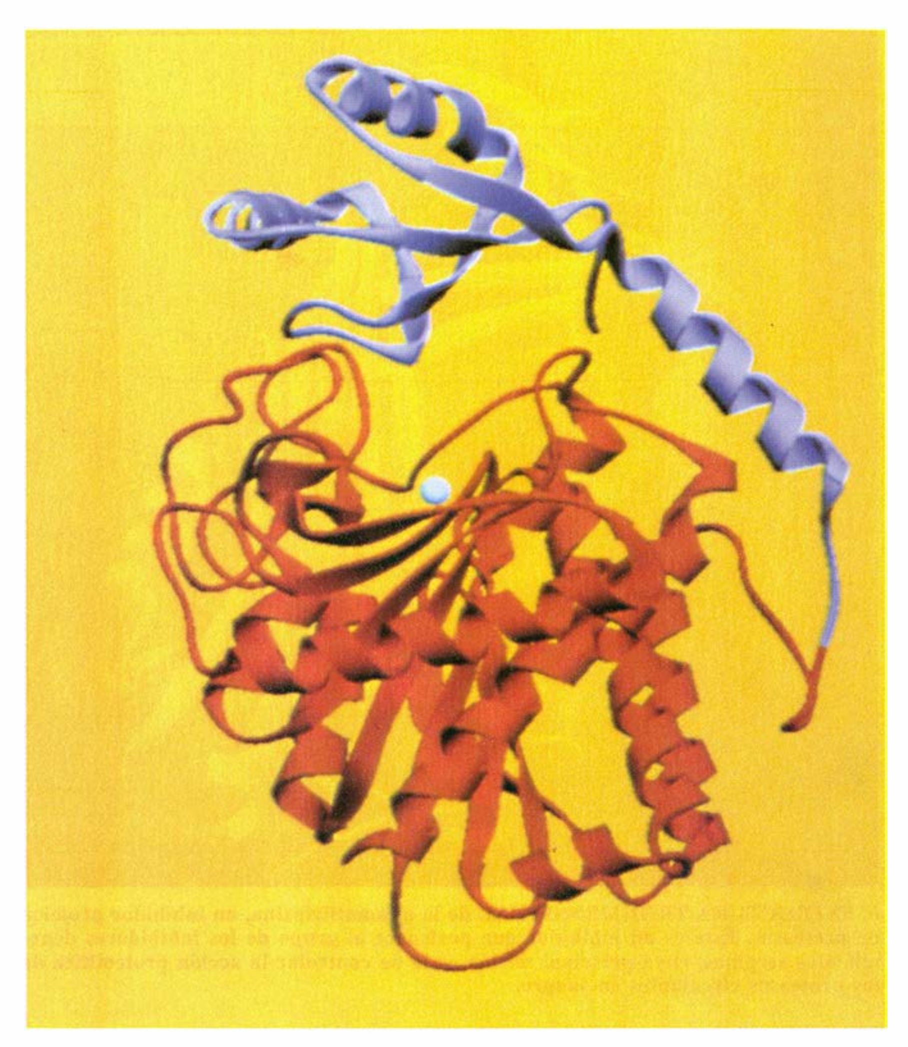
La especificidad enzimática y la secuencia de aminoácidos varían de una proteasa vírica a otra, aunque siempre podemos reducirlas a una de las cuatro clases mencionadas. Las proteasas de los retrovirus, por ejemplo, son homólogas de asparticoproteasas; las de rinovirus y ciertos virus de plantas se incluyen entre las serinaproteasas, no obstante poseer algunas de ellas un aminoácido cisteína reactivo en su centro activo; en los picornavirus, adenovirus y togavirus se han encontrado cisteinaproteasas.

Se sospecha que algunas proteasas de virus necesitan la concurrencia de las proteasas de las células huésped y de otros factores para procesar las

poliproteínas, sin que ello contradiga la opinión de que la mayoría de las proteasas de que se valen los virus estén codificadas en su propio ADN. Por eso, el diseño de inhibidores específicos contra las proteasas víricas puede convertirse en eficaz estrategia antivírica con bajo riesgo para el huésped.

Así se espera que ocurra con el síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA). Después de clonar y secuenciar el ácido nucleico constitutivo de una de sus formas (la HIV1, la más infectiva), se consiguió sintetizar *in vitro* la proteasa responsable del procesamiento de sus poliproteínas precursoras. A continuación, se cristalizó la proteasa y se determinó su estructura tridimensional mediante difracción de rayos X. Esta estructura es muy semejante a la de la proteasa del virus del sarcoma de Rous y a la pepsina de mamíferos.

Sin embargo, existe una gran diferencia entre el número de aminoácidos de la pepsina (327 residuos) y el de las proteasas de virus, que no llegan a la mitad de esta cifra; dicho de otro modo, el virus del sida se ahorra, para codificar su proteasa, la mitad de la cantidad de ácido nucleico que los animales emplean para sintetizar la pepsina. Para compensar esta diferencia, se hace necesario que dos unidades de proteasa se asocien y conformen el centro activo. Actualmente, y gracias a estos conocimientos estructurales, ya se han podido diseñar inhibidores específicos de la proteasa del virus del sida. De acuerdo con ciertas pruebas clínicas preliminares, podrían frenar el desarrollo del virus sin comportar efectos laterales. Se cree que pueden constituir un fármaco más seguro que las vacunas contra proteínas de superficie del virus, ya que éstas mutan muy rápidamente a lo largo de diversas generaciones del microorganismo.



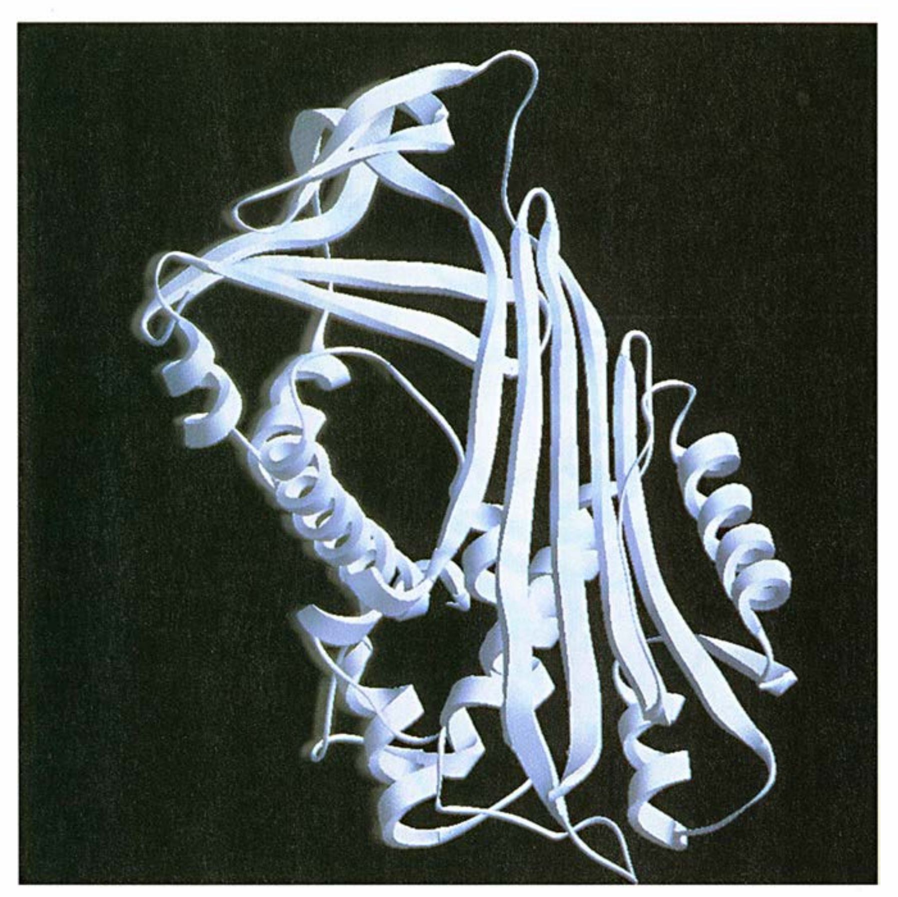
5. INHIBICION Y ACTIVACION DE PROCARBOXIPEPTIDASAS. El gran segmento de activación de las procarboxipeptidasas (*parte superior*) se pliega en una hoja formada por cuatro cintas beta, enlazadas en una de sus caras por dos hélices alfa. A través de un bucle que emerge de la otra cara de la hoja beta se produce la interacción con la región del centro activo de la enzima (*blanco*), algunos de cuyos residuos esenciales quedan enlazados, perdiendo la capacidad de unir substratos peptídicos y produciéndose una inhibición de la región enzimática. Durante la activación de la proenzima por la tripsina se producen cortes en la región de conexión entre la parte globular del segmento y la enzima activa. La liberación del segmento de activación con su región C terminal recortada por proteolisis permite la aparición de la actividad carboxipeptidasa.

Pero las proproteínas más estudiadas y que han servido de modelos para las demás han sido los zimógenos de proteasas digestivas. Abordaremos las procarboxipeptidasas, precursoras de las carboxipeptidasas, proteasas cuya misión consiste en degradar secuencialmente las proteínas substrato a partir de su extremo carboxiloterminal. Estos zimógenos se presentan en el páncreas de los vertebrados en formas de elevada masa molecular (unos 400 aminoácidos), que generan enzimas activas de especificidades distintas: las carboxipeptidasas A y B.

Las enzimas activas A digieren proteínas alimentarias, escindiéndoles los aminoácidos apolares; las enzimas B escinden aminoácidos cargados positivamente (lisinas y argininas). Las procarboxipeptidasas A se suelen encontrar en mezclas de formas monoméricas y de complejos cuaternarios con otras proproteasas, mientras que las procarboxipeptidasas B se hallan siempre constituidas en monómeros.

La resolución de la estructura tridimensional de las procarboxipeptidasas pancreáticas y la identificación de sus mecanismos de inhibición y activación se han llevado a cabo en nuestro laboratorio de la Universidad Autónoma de Barcelona en colaboración con el laboratorio de R. Huber, del Instituto Max Planck de Munich, y el de K. Wüthrich, del Instituto Politécnico de Zurich. Para ello, cristalizamos las proenzimas A y B de páncreas de cerdo y estudiamos su estructura por difracción de rayos X. Se observa que el gran segmento de activación —formado por los 95 residuos aminoterminales en cada zimógeno— adopta una conformación globular y cubre el centro activo de la región enzimática, impidiendo la correcta fijación de substratos.

La técnica de resonancia magnética nuclear nos ha permitido conocer el plegamiento espacial del segmento de activación aislado en disolución y comparar esta estructura con la que se muestra integrada en el zimógeno. En los dos zimógenos se ha observado que cuatro regiones distintas del segmento de activación se pliegan en cinta beta y forman una hoja beta antiparalela, es decir, se sitúan



6. ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL de la alfa$_1$antitripsina, un inhibidor proteico de proteasas. Este es un inhibidor que pertenece al grupo de los inhibidores denominados serpinas, cuya principal misión es la de controlar la acción proteolítica de las proteasas circulantes en sangre.

una al lado de la otra con sentidos de avance contrarios. Sobre una de las caras de esta hoja beta se colocan dos hélices alfa que unen las cuatro cintas beta. La otra cara de la hoja beta se une al centro activo de la región enzimática.

Durante la digestión, y al ser secretadas al intestino junto con otras hidrolasas pancreáticas, las procarboxipeptidasas A y B sufren la degradación de su segmento de activación y se tornan funcionales. En esa proteolisis limitada, en la que la acción hidrolítica principal corresponde a la tripsina, ambas proenzimas pierden un cuarto de su molécula. La tripsina produce un corte rápido en el nexo de unión entre la región de la enzima activa y su segmento de activación. Después de este primer paso, la tripsina prosigue lentamente su acción hidrolítica sobre aminoácidos adyacentes, recortando el segmento de activación desde su extremo carboxiloterminal. En esta acción de recorte participa la propia carboxipeptidasa generada.

A medida que va mermando la longitud del segmento de activación, se van debilitando el número y la intensidad de las fuerzas de tipo no covalente que lo unen a la enzima activa y provocan su inhibición, hasta que se produce la disociación total. El proceso de disociación, y la activación consecuente, ocurren con mayor celeridad en las procarboxipeptidasas B que en las A.

Quedan diversas preguntas en el aire. ¿Qué función biológica desempeñan los complejos cuaternarios de estas proenzimas con otras proproteasas? ¿Pueden desempeñar los fragmentos de activación, una vez liberados, una función secundaria, tal como de tipo hormonal o transportadora? La utilización de un segmento de 95 aminoácidos (tamaño equivalente al de muchas proteínas pequeñas) para mantener inactivas tales proenzimas, y acometer su degradación posterior, parece un dispendio excesivo, en especial si recordamos que, en ciertas carboxipeptidasas tisulares (las del sistema nervioso, por ejemplo), podría bastar un segmento de activación de 5 aminoácidos para el mismo fin.

Existen, en efecto, carboxipeptidasas no digestivas, que cumplen importantes funciones proteolíticas de regulación en el procesamiento de hormonas y neuropéptidos (carboxipeptidasa H/E), en el control de la actividad de péptidos y hormonas peptídicas en circulación por el torrente sanguíneo (carboxipeptidasa N), en el control tisular de la actividad de hormonas peptídicas (carboxipeptidasa M) y en fenómenos de proteolisis en reacciones anafilácticas (carboxipeptidasa MC). En todos los casos citados se han encontrado secuencias de aminoácidos que descienden, evolutivamente hablando, de las carboxipeptidasas pancreáticas. No obstante, sólo en las formas H/E y MC se ha observado la presencia de formas precursoras y de segmentos de activación.

Por si fuera poca la variedad de proteasas de los sistemas biológicos, en los últimos años se está descubriendo que los seres vivos han desarrollado todo un arsenal de moléculas inhibidoras, muchas de ellas de estructura proteica. A veces, esos inhibidores protegen a los tejidos o fluidos biológicos de la activación prematura de proproteasas, de la pérdida de proteasas de orgánulos que los contienen (como los lisosomas), o del ataque de las proteasas de organismos invasores o predadores; en otros casos, sin embargo, los inhibidores modulan la actividad proteolítica.

Pertenecerían a este último grupo los inhibidores de proteasas que se hallan en la sangre, fluido que puede considerarse una auténtica sopa de inhibidores (a ellos corresponde un 10 por ciento, en peso, de las proteínas de la sangre). El más espectacular de estos inhibidores sanguíneos es la alfa$_2$macroglobulina, proteína de unos 700 aminoácidos, dividida en cuatro subunidades que forman en el espacio una gruta en cuyo interior se esconde el sitio inhibidor. Este inhibidor, que se encuentra en cantidades de aproximadamente 2,6 gramos por litro de sangre, une proteasas de diversa especificidad, que le producen un corte en el sitio bloqueante; en virtud de ello se establece un enlace covalente entre ambas moléculas y el cierre de la gruta, englobando a la proteasa e inactivándola.

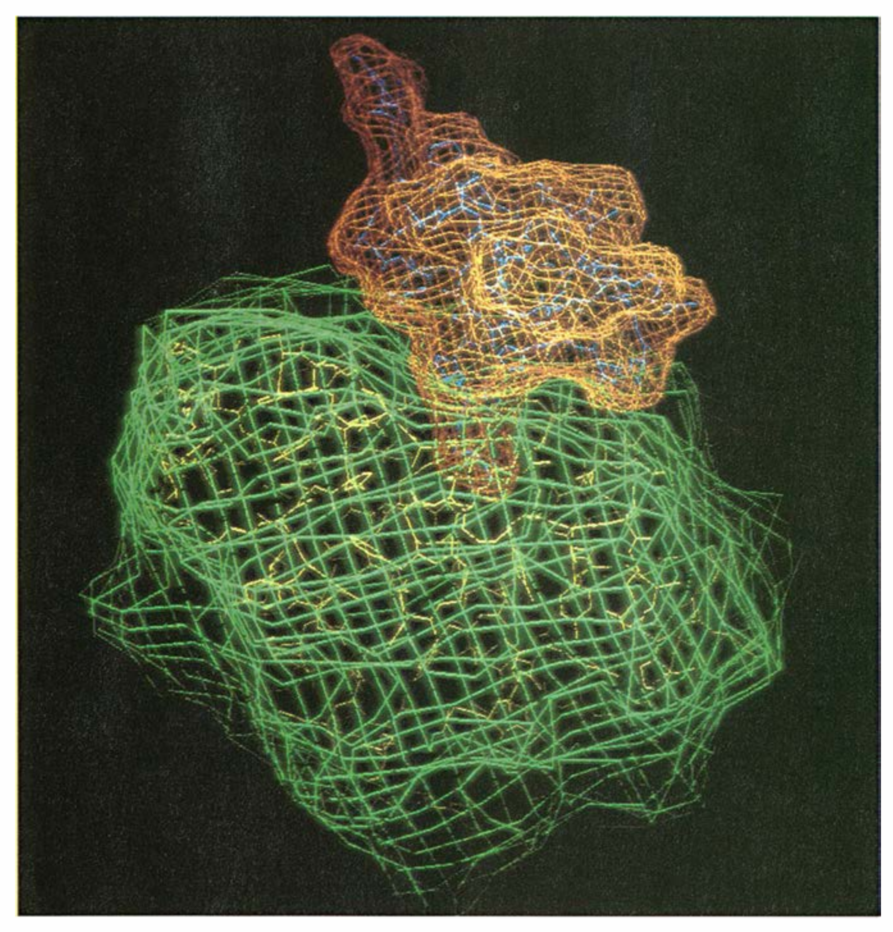
Otros inhibidores sanguíneos, como el inhibidor alfa$_1$ de proteinasas, la alfa$_1$antitripsina, la alfa$_1$antiquimotripsina, la antitrombina III, y el inhibidor$_1$ del activador del plasminógeno, son menores (constan de unos 450 aminoácidos) y muestran entre sí homologías estructurales que indican una semejanza conformacional y un origen evolutivo común. De hecho, todos estos últimos se inscriben en la familia de las "serpinas", cuya función inmediata consiste en limitar en el tiempo y en el espacio la ac-

ción proteolítica de los factores involucrados en la coagulación de la sangre y en la fibrinolisis.

Los inhibidores proteolíticos acostumbran ser, sin embargo, bastante menores; poseen su región de inhibición localizada en un pequeño bucle. Este es el caso de la familia de los ovomucoides (en los huevos de aves y anfibios), las familias de inhibidores pancreáticos de vertebrados, y la de ciertos inhibidores vegetales. Hablamos de familias, ya que existen muchas variantes de cada inhibidor. También varía su tamaño, que, a medida que decrece, ofrece mayor proporción de puentes disulfuro estabilizadores. Todos los inhibidores hasta ahora citados inhiben serinaproteasas, y su bucle de inhibición sufre una rotura proteolítica al unirse a la proteasa.

También hay inhibidores de cisteinaproteasas y metaloproteasas. Ejemplos de los primeros son las cistatinas, proteínas de unos 100 aminoácidos y sin puentes disulfuro, que se encuentran en lisosomas de distintos tejidos (tiroides, glándula adrenal, células pancreáticas A y neuronas corticales), así como en fluidos biológicos (sangre, orina), y las estefinas (en granulocitos polimorfo nucleares) y kininógenos (en sangre). Entre los inhibidores de metaloproteasas destacan los de carboxipeptidasas que se han extraído de solanáceas (patata, tomate). Son proteínas de topología parecida a ciertos inhibidores de serinaproteasas también aislados de vegetales (semillas de calabaza), con un núcleo globular muy pequeño y extraordinariamente estable y una cola que actúa de región inhibidora.

La posibilidad de modular funciones reguladas por proteasas ha estimulado la investigación aplicada sobre los inhibidores. Así ha sucedido con los inhibidores de proteasas vegetales, cuya manipulación genética e inserción en plantas no portadoras ha permitido atajar plagas, al producir transtornos digestivos en organismos fitófagos que las atacan.



7. INTERACCION de inhibidores vegetales con las carboxipeptidasas. Los pequeños inhibidores proteicos (37 a 39 aminoácidos) que se extraen de solanáceas (patatas, tomates) forman un complejo muy estable con las carboxipeptidasas pancreáticas o similares. En dicho complejo, el inhibidor introduce su cola C terminal en el centro activo de la enzima, enlazando diversos aminoácidos esenciales para su funcionalidad e impidiendo el acceso de substratos peptídicos al centro activo. Se cree que la inhibición producida es un recurso de ciertos vegetales para inducir trastornos digestivos en organismos fitófagos, haciendo poco atractivo su consumo.

De manera parecida, el suministro de inhibidores o el estímulo de su producción podría facilitar la resolución de diversas patologías de animales superiores en las que intervienen proteasas. Se está ensayando con inhibidores de la trombina como anticoagulantes, de la renina como hipotensivos y de la proteasa neutra de leucocitos en el enfisema pulmonar y en otras patologías del tejido conjuntivo. Cabe también recordar el uso potencial de inhibidores de proteasas para detener el desarrollo del virus del sida o el progreso de la metástasis en ciertos cánceres, como el de mama, en el que está involucrada la proteasa estromelisina, así como en la prevención de la degeneración artrítica debida a la colagenasa y a otras metaloproteasas.

El estudio de la estructura y función de las proteasas y de los sistemas proteicos regulados por proteolisis limitada ha sido y continúa siendo uno de los campos de investigación principal en bioquímica. En la actualidad, estas proteínas constituyen uno de los modelos más utilizados para la aplicación de metodologías de manipulación y transformación genéticas y de ingeniería de proteínas, gracias a su variedad de formas, al profundo conocimiento que se tiene de ellas y a la potencialidad de sus aplicaciones biotecnológicas y biomédicas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PROTEOLYTIC PROCESSING AND PHYSIOLOGICAL REGULATION. Hans Neurath, en *Trends in Biochemical Sciences* (TIBS), volumen 14, págs. 268-271, julio de 1989.

THE TRYPTIC ACTIVATION PATHWAY OF MONOMERIC PROCARBOXYPEPTIDASE-A. Josep Vendrell, Claudio Cuchillo y Francesc X. Avilés, en *Journal of Biological Chemistry*, vol. 265, págs. 6949-6953, abril 1990.

NONCHOLINERGIC ACTIONS OF ACETYLCHOLINOSTERASES: PROTEASES REGULATING CELL GROWTH AND DEVELOPMENT. David H. Small, en *Trends in Biochemical Sciences* (TIBS), vol. 15, págs. 213-216; junio 1990.

THE 3D STRUCTURE OF HIV1 PROTEINASE AND THE DESIGN OF ANTIVIRAL AGENTS FOR THE TREATMENT OF AIDS. Tom Blundell et al., en *Trends in Biochemical Sciences* (TIBS), vol. 15, págs. 425-430; noviembre 1990.

THREEDIMENSIONAL STRUCTURE OF PORCINE PROCARBOXYPEPTIDASE-A: A COMPARISON OF THE A AND B ZYMOGENS AND THEIR DETERMINANTS FOR INHIBITION AND ACTIVATION. Alícia Guasch, Miquel Coll, Francesc X. Avilés y Robert Huber, en *Journal of Molecular Biology*, volumen 224, páginas 141-157; febrero 1992.

Ciencia y empresa

Clasificación borrosa de patrones

Aplicaciones

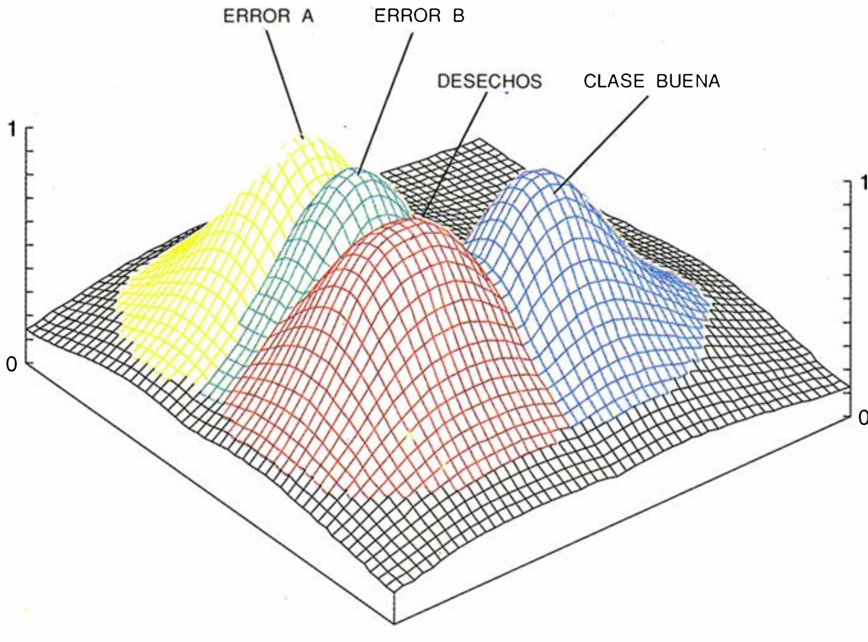
El soldador observa el metal fundido, oye el ruido del soplete y "adivina" si la soldadura está o no saliéndole bien; el médico "observa" síntomas y hace un diagnóstico; el conductor lleva "instintivamente" su coche en situaciones confusas. Hay ejemplos incontables de esta facultad humana de analizar rápidamente sistemas complejos y tomar decisiones relativas a ellos. En muchas tareas por el estilo —como la lectura de un manuscrito o la comprensión del lenguaje hablado— somos, hoy por hoy, superiores al ordenador.

Una persona (con la debida experiencia) puede clasificar inmediatamente un objeto que se le presente y decir si está intacto o estropeado, o determinar si una letra es una *g* o una *y*, es decir, puede hacer un enunciado sobre si ciertas propiedades muy complejas se aplican al objeto presentado. La clasificación borrosa de patrones (*Fuzzy Pattern Classification,* cuyo fundador es uno de los autores de esta nota, Steffen F. Bocklish, de la Universidad Técnica de Chemnitz-Zwickau, en Alemania) consiste en la reproducción en el ordenador de las cadenas de pensamientos —imprecisas, a menudo inconscientes, pero coronadas por el éxito— escondidas tras esas tareas.

Un programa de ordenador para el análisis de patrones debe calcular, a partir de los datos iniciales, si un objeto determinado cumple ciertas propiedades. Los datos iniciales pueden ser, por ejemplo, propiedades, magnitudes o parámetros que, o bien provienen directamente de la señal de medición o bien se calculan a partir de ella por procedimientos matemáticos. La descripción interna del objeto es un enunciado de características que puede ser interpretado como un punto en un espacio de muchas dimensiones.

A comienzos de los setenta generalizamos ya este método clasificatorio, ligándolo a las nuevas ideas de la teoría de conjuntos borrosos, y obtuvimos la técnica de clasificación borrosa de patrones. En ella, para la construcción de modelos se tienen en cuenta, por un lado, y de forma expresa, las imprecisiones y vaguedades de la información disponible, y, por otro, enunciados verbales no métricos que encierran el saber vago de los expertos; el ordenador trabaja así con aquéllas y con éstos.

En el espacio de características se marcan sectores: las clases. Un objeto pertenece a una clase cuando el punto que le corresponde en el espacio de características está en el sector correspondiente. El significado de estas áreas es el de clases de cualidades, de defectos o de acciones de control, y, de acuerdo con la teoría de conjuntos borrosos, se delimitan por medio de funciones de pertenencia. Así, por ejemplo, el sector "buena calidad" se describe mediante una función de pertenencia que, para cada combinación de características, indica en qué medida un objeto que la posea es considerado "bueno".



Modelo clasificatorio de cuatro clases en un espacio de características bidimensional

Tomemos como ejemplo un modelo clasificatorio con cuatro clases, presentado en un espacio de características bidimensional. Como funciones de pertenencia escojamos funciones potenciales paramétricas; se trata de funciones que se concentran alrededor de un punto determinado: en él, el valor de la función es máximo, y a su alrededor cae monótonamente a cero. El resultado concreto de la función se ajusta durante la fase de aprendizaje, en la que sus parámetros se determinan, en experimentos llevados a cabo con objetos elegidos, mediante simulaciones de cálculo o gracias al conocimiento de expertos.

Así como en una red neuronal se entrena a neuronas artificiales para que reaccionen de forma selectiva ante ciertos patrones sin tener para ello que cambiar explícitamente los parámetros de las neuronas, del mismo modo se puede enseñar automáticamente a las funciones de pertenencia qué sector (qué propiedad) deben representar.

En la fase de trabajo usamos esta base de conocimiento. Ahora bien, cuando se tiene un objeto desconocido y, por ejemplo, hay que valorar su calidad o la situación actual de un proceso, debemos entonces "presentar" sus características a los modelos de clases. Estos realizan sus valoraciones; es decir, evalúan las funciones de pertenencia, y, por lo general, ofrecen valores divergentes. La recopilación de esos valores se llama "vector de pertenencia", o también "vector de simpatía". La idea subyacente es la siguiente: tanto mayor será la simpatía entre un objeto y una clase (o la función potencial de la clase) cuanto más se aproxima aquél a la imagen ideal de ésta. El resultado de la identificación nos ofrece un medio práctico de ayuda a la toma de una decisión. No se excluye que el resultado consista en un rechazo por parte del modelo clasificatorio, cuando todas las funciones de pertenencia dan valores muy pequeños.

El procedimiento que acabamos de

describir es de tipo estático. En cada pregunta planteada al sistema obtenemos una respuesta sobre la pertenencia instantánea a una clase. Pero importa la observación de tendencias: si, por ejemplo, pueden detectarse a tiempo cambios en la calidad de los productos en una fabricación en masa, aunque sea en los límites de lo tolerable, se podrán hallar las causas de los defectos y eliminarlos con una intervención oportuna. Sólo podemos imaginarnos evoluciones temporales de este tipo en un espacio de características bidimensional, pero no en otro de muchas dimensiones. No obstante, en cualquier caso nos resulta fácilmente accesible el curso de los valores de simpatía; desciframos tendencias e incipientes cambios de clase, lo que permite la planificación y la intervención a tiempo en el proceso.

Los dominios de aplicación que se advierten son muchos; otros más se pueden prever. Por ahora trabajamos en los siguientes campos: análisis exploratorio de datos, para preestructurarlos a partir de la valoración de cuestionarios; reconocimiento de patrones en el análisis de imágenes, de series temporales y de frecuencias, para el examen de ruidos, y hasta llegar al reconocimiento de una lengua hablada; diagnóstico y vigilancia de procesos, para su conservación preventiva y un reconocimiento precoz de daños; diagnóstico del deterioro de instrumentos con el fin de asegurar su calidad; y control automático —basado en una clasificación— de sistemas de vigilancia ambiental, especialmente depuradoras o vertederos de basuras.

Un dominio que está adquiriendo especial desarrollo es el del análisis de la calidad y su consiguiente control. La calidad, por su imprecisa definición y por resultar de muchas propiedades, constituye una típica variable borrosa. Parece más difícil lograr su determinación absoluta que su determinación relativa, siendo esta última la que se desprende de una comparación de patrones.

Nuestra experiencia proporciona varios ejemplos. Se han obtenido buenos resultados clasificatorios en el reconocimiento de defectos en superficies de materias primas mediante la evaluación de datos de imágenes o la vigilancia sobre la marcha de la capacidad de cortar de los intrumentos.

Los múltiples factores que se influyen mutuamente en un proceso de soldadura complican la automatización del mismo. Para no depender de una discutible descripción teórica de este proceso estocástico y asegurar la calidad de la soldadura, empleamos la clasificación borrosa de patrones. Acudimos a los procedimientos de análisis de señales y acotamos ocho características a partir de las señales de corriente eléctrica y de voltaje de soldadura; aunque muy accesibles, no guardaban relación directa con el problema. Sobre esta base construimos un modelo clasificatorio que describe una clase buena y cinco defectuosas.

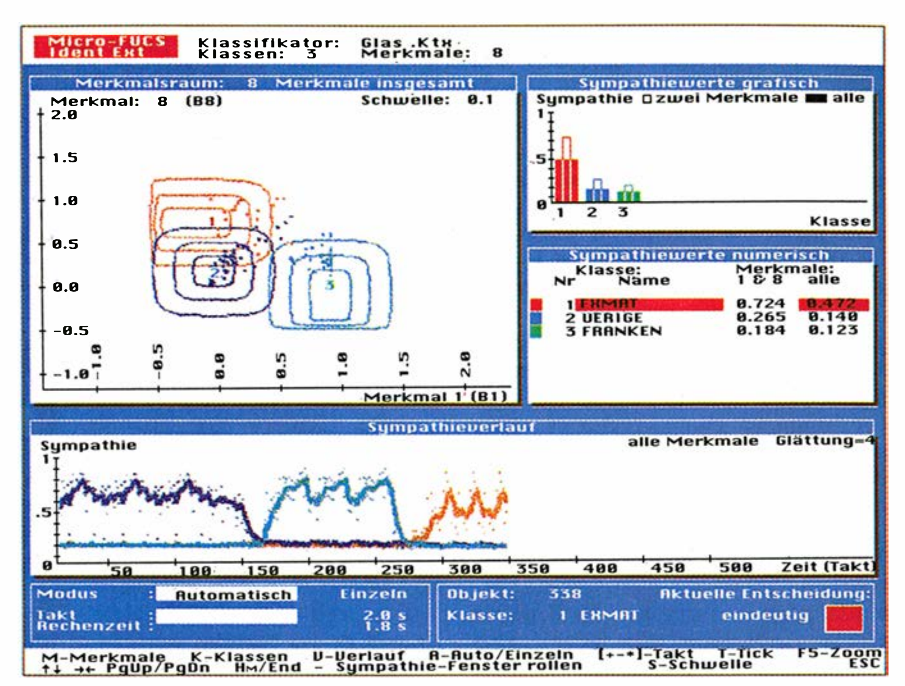


Imagen de monitor del programa micro-FUCS (de fuzzy classification system) para un seguimiento sobre la marcha de los procesos. Quedan representados el modelo de clasificación —a través de líneas del grado de pertenencia constante—, la atribución estática a una clase —en la forma de valores actuales de simpatía— y también el curso temporal de los valores de simpatía

Una cámara frigorífica es un sistema dinámico complicado, cuyo funcionamiento depende de la distribución de presiones y temperaturas en los componentes del circuito frigorífico. De la interpretación de ciertas curvas de temperatura, para intervalos breves, se pueden deducir afirmaciones sobre la calidad de producción. Gracias a la clasificación borrosa de patrones pudimos encerrar este saber especializado en un modelo clasificatorio con once características y siete clases de cámaras frigoríficas correctas y defectuosas. (*Steffen F. Bocklisch y Norman Bitterlich*)

Fusión nuclear

Alternativa energética

El nueve de diciembre del año pasado marcó un hito en el desarrollo de la energía de fusión controlada. A las 23 horas, 8 minutos, en el tokamak TFRT, del laboratorio de física del plasma de la Universidad de Princeton, se produjeron de manera controlada entre tres y cinco millones de watts de potencia de fusión durante 0,2 segundos. El experimento se realizó en plasmas de deuterio con un 50 por ciento de mezcla de tritio. El control de las reacciones de fusión de núcleos de átomos ligeros dejaba así de ser un sueño lejano para asentarse sobre bases científicas y técnicas, que aseguraban la viabilidad de la fusión nuclear como alternativa energética de aquí a treinta años.

La importancia de los experimentos realizados en el TFTR, acrónimo de reactor tokamak de prueba de fusión, se puede resumir en cuatro puntos. En primer lugar, confirman los resultados obtenidos en los experimentos anteriores con plasmas de deuterio y tritio en el tokamak del JET, instalado en Culham, operando con deuterio y un 11 por ciento de tritio. Queda así establecida la capacidad científica y técnica de controlar actualmente reacciones de fusión durante tiempos entre 0,2 y 1 segundos, con la producción de hasta seis millones de watts de potencia, equivalentes a una energía de fusión superior a los tres millones de joules.

En segundo lugar, al utilizar plasmas con concentraciones de tritio del 50 por ciento, se están estudiando por vez primera las reacciones de fusión con la mezcla adecuada de combustible para un reactor de fusión de la primera generación.

En tercer lugar, la potencia de fu-

sión generada y la cantidad de tritio empleada permiten obtener en el TFTR un número suficientemente elevado de partículas alfa, o núcleos de helio. La energía de las partículas alfa, la quinta parte de la energía total liberada en la reacción, sirve para mantener caliente el plasma a las temperaturas de fusión, en lo que se conoce por plasma autoencendido o en ignición. Sépase que la investigación de la generación de partículas alfa y del calentamiento del plasma mediante la energía de las mismas constituirá un punto crucial en el diseño del próximo dispositivo de fusión, que habrá de operar en condiciones de reactor casi estacionarias.

Por último, la realización en el TFTR de experimentos con elevadas concentraciones de tritio a alta potencia permite abordar, a lo largo de este año, los problemas tecnológicos relacionados con el manejo del tritio en condiciones de un reactor de fusión: interacción del isótopo con los materiales, inyección, extracción y recuperación del tritio, licenciamiento y seguridad del reactor, etcétera.

No se ve que, en un futuro más o menos mediato, pueda desarrollarse una fuente de producción de energía a gran escala que satisfaga la demanda energética prevista para mediados del siglo XXI: unos 100 billones de watts anuales o 520.000 millones de barriles de petróleo anuales; esto es, unos 7,6 billones de litros de petróleo anuales o 100.000 millones de toneladas equivalentes de carbón. Las perspectivas de desarrollo de fuentes de energía en cuantía suficiente se basan en tres posibles alternativas: avances técnicos que abaraten los costes de aprovechamiento de la energía solar, mejoras en la solución de los problemas de seguridad y tratamiento de residuos radiactivos de las centrales de fisión nuclear y control y desarrollo de la fusión nuclear.

Los problemas ambientales y de escasez de las energías basadas en los combustibles fósiles (carbón y petróleo), así como la limitación intrínseca de densidad de potencia (watts por centímetro cúbico) de las energías renovables (geotérmica y eólica) determinan que el porcentaje de contribución de esas energías a la satisfacción de la demanda a largo plazo, aunque seguirá siendo apreciable, no permita que se las considere la solución alternativa, sino meramente complementaria.

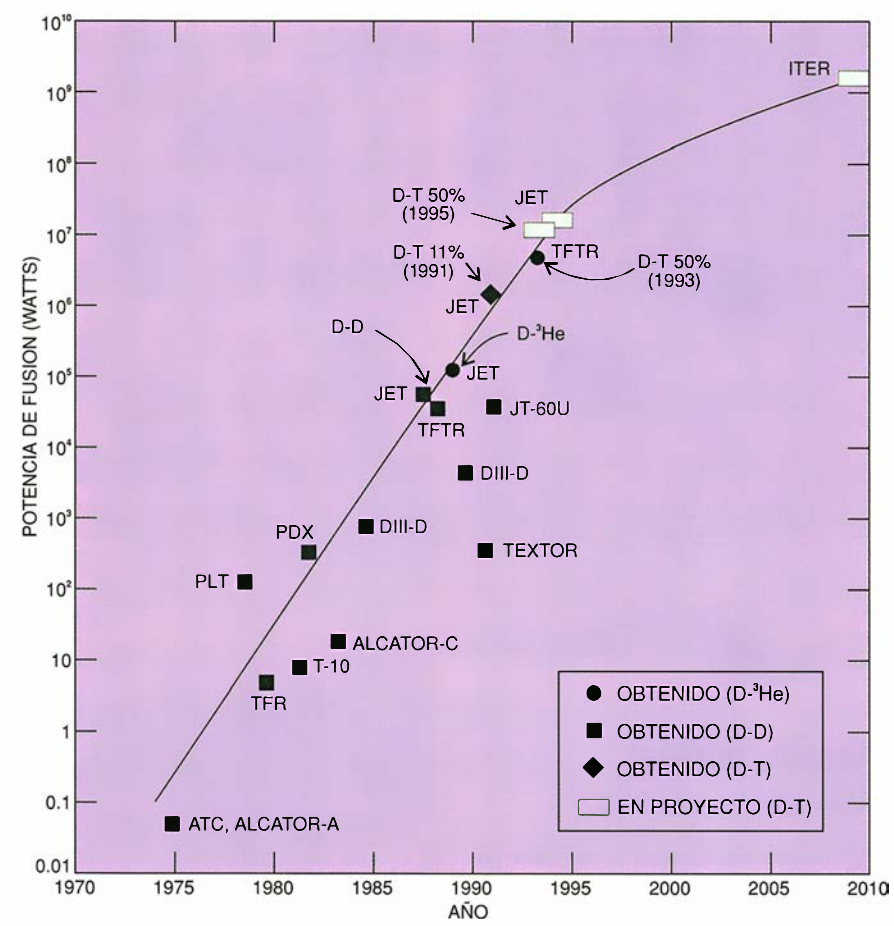
La creación y control de reacciones de fusión en las condiciones requeridas en un reactor guiaron las etapas de diseño (1973-1978), construcción (1978-1982) y operación (desde 1982) de los grandes tokamaks, el JET de la Comunidad Europea, el TFRT norteamericano, el JT-60 japonés y el T-15 de la antigua Unión Soviética. Como consecuencia de las investigaciones realizadas en esos dispositivos a lo largo de los dos últimos años se han dado tres pasos de gigante en el camino del desarrollo de la fusión nuclear.

El primero consistió en el control de las reacciones de fusión durante un segundo, con producción de energía de fusión de 2,2 megajoules en plasmas de deuterio mezclado con un 11 por ciento de tritio. Sucedió en noviembre de 1991, en el JET. Medio año largo después, en julio de 1992, la Comunidad Europea aprobó, ante el éxito del JET, la fase de diseño de la ingeniería del ITER, un reactor de fusión experimental. Tras este segundo paso, el tercero ha sido la producción de seis millones de megawatts con que comenzábamos.

En la primera semana de noviembre de 1991, el tokamat del JET había demostrado que se podía producir, de forma controlada, energía de fusión en el rango comercial de los millones de joules durante un segundo. Semejante logro abrió las puertas para que los responsables de la política científica internacional firmasen un acuerdo cuatripartito (Comunidad Europea, Japón, Estados Unidos y Confederación de Estados Independientes) sobre el diseño de la ingeniería y anteproyecto del tokamak internacional ITER. Este tokamak, con un coste estimado de 6000 millones de dólares en caso de construirse antes de 1998, estaría capacitado para producir entre 1000 y 3000 megawatts de energía eléctrica (el triple de la potencia de una central nuclear actual), en forma semicontinua de períodos de 20 a 60 minutos.

El ITER, que comenzaría a funcionar entre 2005 y 2020, serviría para demostrar la viabilidad técnica de la fusión como fuente de energía y constituiría el paso previo para la erección de un reactor de fusión de demostración (DEMO), prototipo ya de un reactor comercial.

Tanto los resultados del JET de 1991, como el comienzo de las actividades del ITER-EDA (acrónimo éste de "actividades de diseño en ingeniería") de



La potencia de fusión generada en los tokamaks a lo largo de las dos últimas décadas se ha incrementado en siete órdenes de magnitud (de centésimas de watt a millones de watts). La gráfica presenta también los valores proyectados para los próximos años y para el reactor ITER

1992, permitieron trabajar, en diciembre de 1993, con plasmas de deuterio mezclado al 50 por ciento con tritio a inyección de alta potencia (30 megawatts). Los frutos más notables cosechados han sido los siguientes: producción rutinaria de tres a seis millones de megawatts de fusión controlada; obtención de altas temperaturas iónicas (350 millones de grados C) durante más de 0,2 segundos, sin signos apreciables de contaminación del plasma ni deterioro de las propiedades termonucleares de los mismos; producción de energía total de fusión por encima de los 3,6 megajoules; descubrimiento de inestabilidades en el plasma provocadas por la presencia de partículas alfa; obtención de una mejora de hasta un 30 por ciento en el confinamiento de la energía en comparación con plasmas de deuterio mezclado con deuterio, y, por último, predicción de la posibilidad de obtener potencia de fusión de hasta 10 megawatts a finales del año en curso.

Resultados que, tomados en su conjunto, confirman la convicción de que la energía de fusión nuclear constituye una alternativa energética, no sólo posible sino también viable. (*José Antonio Tagle, Iberdrola, Madrid.*)

Comunicaciones

¿Para la rotativa?

Ningún periódico electrónico ha saboreado todavía las mieles del éxito. Nadie ha sido capaz de idear un producto acorde con la era de la informática que sustituya a la bobina de Gutenberg. Pese a los miles de horas empleados en crear programas para entornos gráficos al alcance de cualquiera, menús desplegables y búsqueda por teclado, ningún invento programático ha demostrado que el rapidísimo clic del ratón pueda proporcionar un acceso aleatorio tan aceptable y conveniente como un buen suplemento deportivo.

Pero no importa. Vuelve el periódico electrónico. Los editores buscan, a paso firme, cómo enviar la rotativa al cementerio donde reposan la linotipia y el huecograbado.

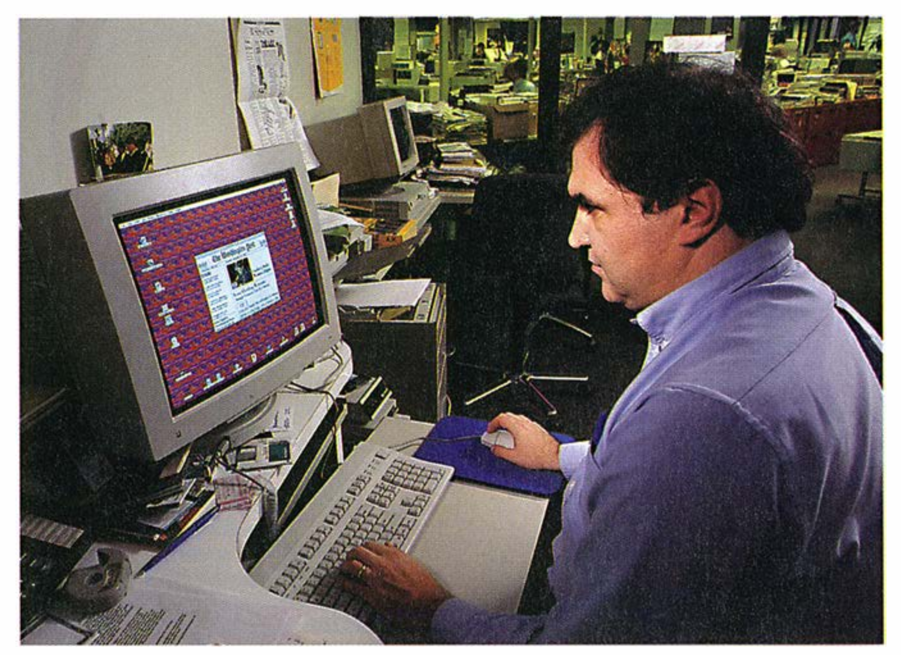
Cierto es que la entrega domiciliaria electrónica no reemplaza al quiosquero de la esquina. También es verdad que hasta ahora los periódicos han resistido la invasión de la radio, la televisión y el canal de información comercial por cable. Pero las fuentes de financiación del periodismo tradicional, los anuncios, han cesado de manar. Ni siquiera los leves repuntes del sector han logrado disipar esa atmosféra de miedo. También ha caído la circulación. Y en España, por ejemplo, ya no hay periódicos vespertinos.

Pero las aguas bajan movidas, sobre todo para los "grandes". En un artículo del nuevo *Wired*, noticiario mensual del ciberespacio, Michael Crichton, autor de *Parque Jurásico*, endosó el epíteto "dinosaurio" al *New York Times* y otros bastiones institucionales. Crichton se quejaba allí: "Su información no es fiable, se torna añeja en seguida y se vende sin garantía. Parece cosa seria, pero es pura bazofia. Con razón, la gente ha empezado a dejar de comprarlo." El corolario que Crichton extrae de esas premisas es que una red electrónica, del estilo de la Internet, proporcionará la información sin recurrir a la superficialidad y marrullería de un periodista gubernamental.

"El artículo era interesante, pero yo creo que está chiflado", replica Mark Potts, encargado de servicios electrónicos del *Washington Post*. Aun con programas de inteligencia artificial para elegir los asuntos de interés personal, la gente no quiere convertirse en ratones de biblioteca. "Una sesión de las Cortes es aburrida como un plomo. Alguien debe destilar el producto y eliminar la paja."

Por si acaso, el *Washington Post* acaba de comenzar los ensayos con PostCard: un método de envasar y adornar la información para el lector de la Nueva Era. En el prototipo, dispuesto para ordenador Apple, el lector puede llamar una videonoticia de la sesión de confirmación del Fiscal General, seguir una información ilustrada sobre el terremoto de Los Angeles, escribir una carta al director, comprar las entradas para el partido de fútbol, buscar las ofertas de trabajo clasificadas, seguir la pista a un paquete personal de acciones o calcular cómo va a afectar a las finanzas personales un cambio en la legislación tributaria. Con el tiempo, una versión comercial del servicio podría estar también a disposición en televisión por cable.

Mediante un uso juicioso de la tecnología, el viejo producto de celulosa puede ofrecer información de mayor calidad por la que clama Crichton. Frank Daniels III, consejero delegado del *News & Observer* de Raleigh, ha incluido una dirección Internet debajo mismo del número de teléfono que aparece bajo su nombre en el encabezamiento del periódico. Fue Daniels quien convenció al presidente, su reacio padre, para que inyectase 250.000 dólares anuales en el departamento de investigación del periódico. Los viejos montones de recortes de la hemeroteca del periódico se han reforzado con más de 150 bases de datos para uso de los redactores. Hay de todo: 70.000 archivos de contribuciones a campañas que se remontan a 1987, mapas del censo calle por calle, un sistema de seguimiento legislativo y una conexión remota durante las 24 horas a una selección de archivos del condado y del estado. Parte de esta información podría con el tiempo compilarse y venderse a inmobiliarias y bufetes de abogados. (*Gary Stix*)



POSTCARD, el prototipo de periódico electrónico del Washington Post

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Nudos, cadenas y cintas de vídeo

“Las palomitas ya están a punto y Carolina ha traído los refrescos. ¿Has podido alquilar la cinta en la videoteca?”, preguntó Brais.

“Pues claro”, replicó Alicia. “*Exterminator 4*, como queríais.”

“Me encanta Ernie Scrambledegger”, supiró Carolina

Brais insertó la cinta en el aparato. La pantalla mostró una configuración de líneas blancas irregulares que dio paso enseguida a los títulos de crédito. El trío, desconcertado, mantuvo los ojos clavados en la pantalla. “A lo mejor es un anuncio”, dijo Alicia queriendo poner esperanza en la voz.

“No me lo parece”, atajó Brais. “Alicia, ¿qué demonios es *Not Knot*?”

“Sea lo que fuere, está claro que no es *Exterminator 4*”, saltó Carolina con voz poco amable.

En la pantalla, una masa de tubos vermiformes se agitaba y retorcía de un lado a otro, como los últimos espasmos de un celentéreo agonizante.

“Es de extraterrestres”, dijo Carolina con voz segura. “Vale, marchando una de extraterrestres.”

“Creo que no”, dijo Alicia. “La verdad es que estoy casi segura de reconocerlo. Es un vídeo de matemáticas producido por el Centro de Geometría de la Universidad de Minnesota.”

“La verdad es que vivimos en la era de las matecomunicaciones”, susurró Carolina. “Aquella gente consiguió una fuerte dotación para crear el Centro; ésta es una de las cosas que han hecho. ¡Oye, esos gráficos son estupendos! Fijaos en esas cajas transparentes. ¿De qué va todo esto, Alicia?”

“Se trata de unos descubrimientos impresionantes sobre la topología de los nudos”, explicó Alicia.

“¿Qué es la topología?”, quiso saber Brais, justo cuando Carolina, perpleja, decía “¿Nudos...?”

“Vamos a ver... Imaginad que formamos un nudo en un tubo y que después soldamos los extremos del tubo para que el nudo no pueda deshacerse. La cuestión es: ¿se podrá reconocer en qué casos son equivalentes dos de tales nudos? Esto es, ¿se podrá deformar uno de ellos hasta convertirlo en el otro, doblando y retorciendo el espacio que los rodea, pero sin romperlo ni desgarrarlo?”

“¿Cómo es posible desgarrar el espacio?”, se extrañó Carolina. “¿Y retorcerlo?”

“Imagina que está lleno de una especie de vaselina o silicona muy suave, filante y maleable. Ese material se puede doblar o romper.”

“¿Y eso es matemáticas? ¿Vaselina filante?”

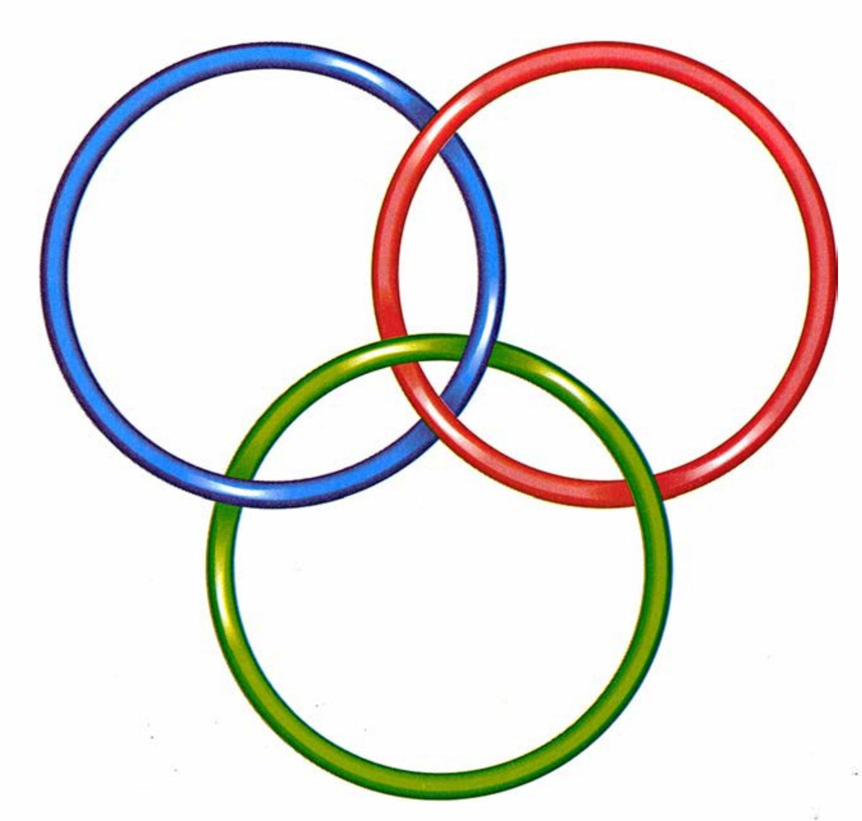
“El universo no sólo es más desconcertante de lo que sabemos, sino más de lo que podemos saber”, repuso Alicia. “Y sobre todo, las matemáticas. Puedes dar gracias de que sólo lo estemos llenando con vaselina.” La pantalla cambió, mostrando tres aros concatenados [*figura 1*].

“Eso es una concatenación”, adelantó Alicia. “Viene a ser como un nudo, pero con más tubos. Los que veis son los aros de Borromeo, que son famosos porque ningún par está concatenado, pero el sistema de los tres sí lo está. Quiero decir que, si cortas uno cualquiera, el montaje se deshace, pero si no, se mantiene de una pieza.”

Se quedaron un momento atentos a la pantalla. “Y esto otro, ¿qué es?”

“Nos están mostrando que, si prescindimos de los tubos anudados y nos fijamos sólo en el espacio que dejan fuera —en el complemento del nudo, ésa es la expresión—, nos encontramos con que nudos no equivalentes tienen complementos no equivalentes.”

Si te he entendido bien, dijo Carolina, el complemento viene a ser como la totalidad del espacio relleno



1. Los aros de Borromeo

de vaselina, pero en el cual se ha se excavado un túnel, donde se encontraría alojado el nudo. Si fuera posible deformar el espacio exterior a un nudo hasta conseguir que fuera como el espacio exterior a otro, ¿no resultaría arrastrado también el nudo?"

"Sí, pero imagino que podría quedar retorcido, por así decirlo", comentó Alicia. "De todas formas, no puede ser tan evidente, porque ese mismo enunciado es falso en el caso de las concatenaciones. Es posible hallar concatenaciones que tengan el mismo exterior pero cuyos interiores sean diferentes" [*véase el recuadro*].

"El razonamiento parece requerir que se den cortes", protestó Brais. "Tenía entendido que no era lícito cortar el espacio."

"Tienes razón, os he mentido. Se puede cortar, con tal de que luego vuelva a ser pegado, dejándolo exactamente como estaba."

"Pero entonces se puede desanudar cualquier nudo", protestó Brais. "Cortas el tubo, deshaces el nudo y después vuelves a pegarlo."

"Esa es la razón de que sea obligatorio deformar no sólo el nudo, sino también el espacio que lo rodea", explicó Carolina. "Lo cual, a su vez, es la razón del título *Not Knot* (No es nudo)."

"El vídeo quiere hacernos ver que los complementos nodales poseen una estructura geométrica natural que puede servir para distinguir nudos no equivalentes. Lo más interesante es que la geometría resultante no es euclídea", explicó Alicia.

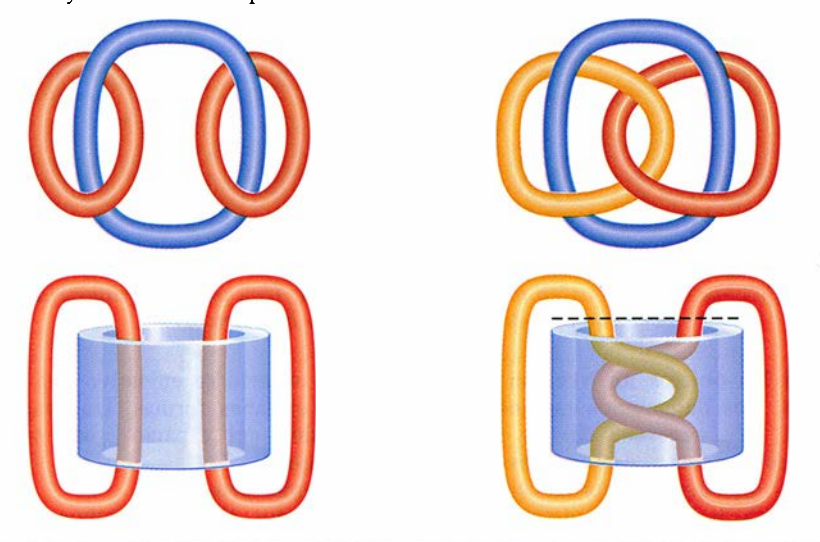
"¿Nos estás diciendo que hay más de un tipo de geometría?", preguntó Carolina.

"Hay montones de tipos de geometría distintos; la geometría euclídea ordinaria es solamente una de ellas. La principal diferencia de las geometrías no euclídeas es que las rectas paralelas se comportan de formas curiosas e incluso pueden no existir en absoluto. Podemos visualizar geometrías no euclídeas bidimensionales sustituyendo el plano por superficies curvadas, por ejemplo, esferas o sillas de montar, en las cuales se trazarían las líneas notables y demás. Pero en el caso de los complementos de los nudos es necesario considerar espacios curvados tridimensionales, lo que resulta bastante difícil. Por eso, lo que hace el vídeo es llevarte en volandas de un lado a otro por el interior de tal espacio y mostrarte el aspecto que tendría."

Brais miró la pantalla, donde cochecitos diminutos se perseguían unos a otros en torno a un cono. "¿Qué tenemos ahí? ¿Moscas en coche?"

Concatenaciones no equivalentes con complementos equivalentes

Las dos concatenaciones de la parte superior no son equivalentes. En la representación topológicamente equivalente (*abajo*), uno de los eslabones ha sido estirado hasta formar un grueso tubo cilíndrico. Cortemos la figura de la derecha por la base superior del cilindro (*línea de trazos*). Si hacemos girar los eslabones para deshacer la torsión y volvemos a cerrarlos, obtenemos la figura de la izquierda. Queda demostrado así que los complementos son equivalentes. Ahora bien, mientras que la concatenación de la izquierda se deshace por completo al cortar el tubo cilíndrico, no ocurre así con la de la derecha, por lo que una y otra no son equivalentes.



"El vuelo vendrá más adelante. Aquí nos están mostrando cómo crear geometrías no euclídeas por el procedimiento de cortar una rebanada del espacio ordinario y pegar los bordes. Es lo mismo que se hace para construir un cono a partir de un disco de papel: se recorta un sector circular y se pegan los bordes. Lo que pasa es que tenemos que imaginar ahora cuál será el efecto de proceso de pegado. La idea es que, siempre que al dibujar una recta lleguemos al borde de la rebanada, hay que saltar inmediatamente al correspondiente lugar del otro borde de la rebanada y continuar el trazado. Con ello las rectas se doblan, por así decirlo, aunque cada uno de sus tramos sigue siendo recto, con lo cual no sólo se obtienen efectos curiosos con las rectas paralelas, sino que una línea 'recta' puede también doblarse, dar la vuelta y cortarse a sí misma."

"Pero, Alicia... ¿cómo puede una recta estar doblada?", inquirió Brais.

"Es que al decir 'línea recta' me refiero a la línea más corta que une dos puntos. Cuando el espacio tiene geometría no euclídea, sus líneas rectas no siempre nos parecen rectas a nosotros, que lo estamos viendo desde fuera.

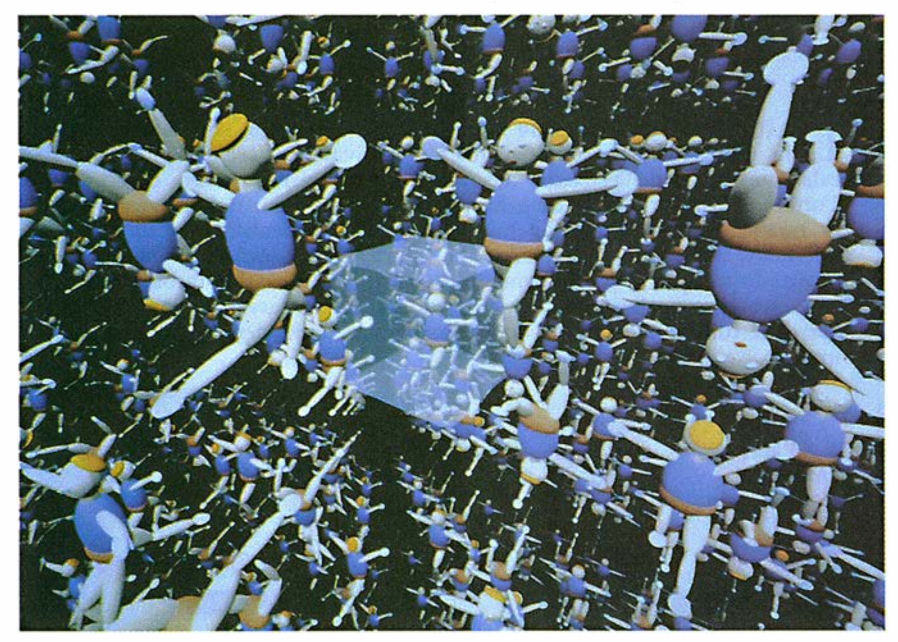
"Otra forma de crear geometrías no euclídeas consiste en utilizar espejos. Algo así como un caleidoscopio. Los espejos tienen el mismo efecto, pues cambian la dirección de los rayos de luz. Imagina, por ejemplo, que te encuentras en una habitación cúbica cuyas paredes, suelo y techo sean espejos. ¿Qué es lo que ves?"

Carolina reflexionó unos instantes. "Réplicas de mí misma."

"Así es. Las imágenes del cubo rellenarían el espacio, y mirases en la dirección que mirases te verías a ti misma. Bueno, a un reflejo tuyo. Pero matemáticamente hablando podemos fingir que cada reflejo eres tú verdaderamente. Hacerlo así equivale a 'pegar' entre sí los espejos opuestos, de la misma forma que pegamos los bordes del cono. Pero ahora nos resulta un espacio tridimensional dotado de una geometría extravagante. Por ejemplo, la línea recta que sale de tu frente y viaja horizontalmente hacia adelante acaba por retornar a tu frente."

"Entonces, ¿las líneas rectas pueden dar media vuelta?"

"En efecto. Pero aun así siguen siendo rectas, lo cual te sería completamente natural si fueras un ser que viviera en el complemento de un nudo. Podemos ahora preparar espejos —matemáticos, no físicos— de un tipo diferente, que además de re-



2. Reflexiones invertidas en todas las direcciones. Una posible geometría para el complemento de los aros de Borromeo

flejar los objetos los vuelvan cabeza abajo. Los llamaremos espejos inversores, ¿de acuerdo? Si las paredes del cubo fuesen espejos inversores, verías muchísimas reproducciones de ti misma, pero algunas estarían cabeza abajo [*figura 2*]. Esta geometría concreta, a saber, un cubo cuyas caras fuesen espejos inversores, es una posible geometría para el complemento de los aros de Borromeo. El vídeo explica por qué es así. Un espejo inversor —en el sentido que hemos venido diciendo— es un lugar en el cual el espacio se envuelve a sí mismo de extrañas formas. Una especie de torsión del espacio. ¿Me seguís hasta aquí?"

"A duras penas."

"Tomemos ahora tres tubos distintos que formen los aros de Borromeo y estiremos cada tubo hasta hacerlo muy largo y delgado, con lados rectos en casi toda su longitud. Como una pista de atletismo, sólo que los tramos rectos de la pista serían muchísimo más largos. Haciéndolo correctamente se obtienen un par de tubos paralelos que corren de norte a sur, por ejemplo; otro par que va de este a oeste, y un tercer par que va de arriba abajo. Tendremos, además, una serie de piezas en forma de horquilla que los conectan en cada extremo, piezas que llevaremos hasta el infinito para no tener que contar con ellas."

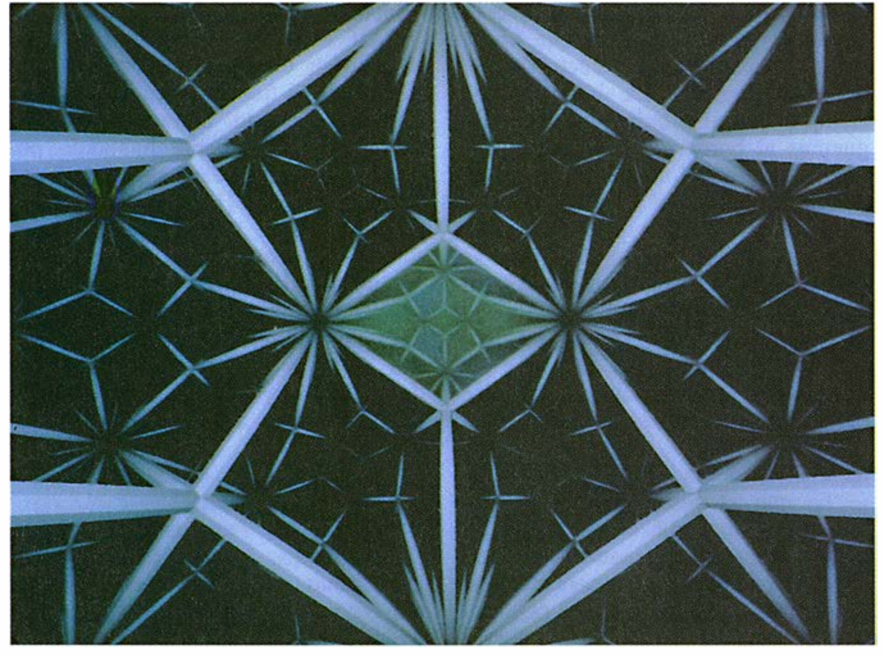
"Entendido."

"Podemos encontrar una disposición similar de rectas en un cubo. Tracemos en el techo y en el suelo una recta que corra de norte a sur por el centro. En dos de las paredes, trazamos líneas horizontales que vayan de este a oeste. En las paredes restantes, tracemos rectas verticales que suban por el centro. Lo importante es que esas líneas permanezcan invariables al 'reflejarlas' en espejos inversores situados en las caras del cubo. Ello nos permite relacionar la geometría correspondiente con el complemento de los anillos de Borromeo. De ahí resulta que, al realizar todas las reflexiones inversoras, las imágenes de las líneas de los cubos encajan entre sí, con lo que se alargan hasta el infinito, lo mismo que los aros de Borromeo cuando llevamos las horquillas hasta el infinito. Y eso significa que el espacio que las rodea —esa curiosa geometría que muestra montones de reproducciones, algunas cabeza abajo— es igual que el espacio que rodea a los anillos de Borromeo."

"La noche todavía es joven", dijo Brais. Se detuvo, impresionado. "Oye, esta parte es una auténtica preciosidad. Es como estar dentro de una especie de jaula e ir pasando de un sitio a otro a través de los barrotes."

"Esta es la secuencia del vuelo", explicó Alicia. "Los barrotes son las aristas de dodecaedros. Bueno, en realidad todos son el mismo dodecaedro, porque hemos de imaginar todo pegado entre sí como lo estaban las caras del cubo. Pero si viviéramos en el seno de ese espacio, veríamos múltiples copias de todo, como en la fotografía de los espejos inversores. Se trata de otra geometría que se puede obtener a partir del complemento de los anillos de Borromeo utilizando un "espejo" de otro tipo. Si colocamos espejos normales en las caras de un cubo, se obtienen imágenes cúbicas que rellenan el espacio; análogamente, espejos no euclídeos en las caras de un dodecaedro producen imágenes dodecaédricas que rellenan espacio no euclídeo. Las aristas forman ángulos rectos, lo que permite adosarlos de cuatro en cuatro; por eso pueden rellenar espacio."

"Para el carro", interrumpió Caro-



3. Una pavimentación no euclídea del espacio mediante dodecaedros regulares

lina. “Lo que yo entiendo por dodecaedro es un sólido que tiene doce caras pentagonales.”

“Así es.”

“Pero las caras no forman ángulos rectos.”

“En el espacio euclídeo, no. En eso tienes razón. Pero este espacio es no-euclídeo; es curvo, si prefieres decirlo así. Se curva lo justo para lograr que los dodecaedros se acoplen en ángulo recto.”

“Me parece que ya lo veo.”

“En el vídeo se ve perfectamente, desde luego. Vuelas a través de ese espacio; puedes ver qué aspecto tiene, sentir verdaderamente los curiosos efectos de curvatura debidos al carácter no euclídeo de su geometría [*véase la figura 3*]. Es verdaderamente extraña y hermosa.”

“Sí”, dijo Brais. “Al cabo de un rato te engancha. No me costaría vivir en un sitio como ése. Es muy amplio.”

“¿Qué quieres decir?”

“Bueno, al volar de esta forma por él podemos ver que rodeando a cada pieza dodecaédrica hay muchas más teselas de las que podríamos alojar en el espacio euclidiano ordinario. La cantidad de espacio aumenta sin cesar al movernos hacia fuera.”

“A eso se le llama curvatura negativa. Nos indica que estamos en lo que se conoce por espacio hiperbólico, un tipo particular de geometría no euclídea. Y ése es el aspecto fundamental del vídeo. Según un descubrimiento reciente debido a William P. Thurston casi todos los complementos de nudos y concatenaciones tienen una geometría hiperbólica natural. Existen unas pocas excepciones, todas ellas conocidas. Y se puede utilizar la estructura geométrica para clasificar todas las demás. Esto es, los nudos o concatenaciones no equivalentes tienen estructuras geométricas diferentes. Es una sorprendente conexión entre la geometría flexible de la topología y la geometría rígida de los espacios no euclídeos. Por lo cual ocurre ahora que una rama muy pasada de moda de las matemáticas —la geometría no euclídea— vuelve a estar en boga.”

“Grandioso”, dijo Carolina, rebobinando la cinta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NOT KNOT. Vídeo. Dirigido por Charlie Gunn y Delle Maxwell. Suplemento preparado por David Epstein y Charlie Gunn. Producido por Geometry Center, University of Minnesota, 1991. Distribuido por A. K. Peters, Wellesley, Mass. Teléfono: (617) 235-2210.

Libros

Luis Alonso, Agustín Albarracín y Jesús Martín

Animalia

Al compás del tiempo

CONTRIBUTIONS À L'HISTOIRE DES CONNAISSANCES ZOOLOGIQUES. Dirigido por Liliane Bodson con la colaboración de Roland Libois. Université de Liège; Liège, 1991.

ARISTOTLE. DE ANIMALIBUS. MICHAEL SCOT'S ARABIC-LATIN TRANSLATION. Edición preparada por Aafke M. I. van Oppenraaij. Editorial E. J. Brill; Leiden, 1992,

ROBERT GROSSETESTE. HEXAËMERON. Edición preparada por Richard C. Dales y Servus Gieben. Oxford University Press; Oxford, 1990.

MARTIN LISTER'S ENGLISH SPIDERS. Edición preparada por John Parker y Basil Harley. Harley Books; Colchester, 1992.

THE AMBIGUOUS FROG. THE GALVANI-VOLTA CONTROVERSY ON ANIMAL ELECTRICITY, por Marcello Pera. Princeton University Press; Princeton, 1992.

En el catón de la etnología se lee que cada cultura tiene su propia manera de considerar el entorno local, incluidas su fauna y su flora. Lo que es válido para los pueblos atrasados como para nuestros esquemas cribados por el tamiz de la ciencia. El estado de la zoología puede servirnos de patrón para medir el progreso desde una condición de primitivismo hasta nuestros días. No abundan, sin embargo, los estudios sobre el desarrollo del conocimiento humano sobre los animales. Liliane Bodson, especialista en entomología clásica, se ha empeñado en remediar esa situación y son varios ya los coloquios que ha dirigido en la Universidad de Lieja, publicados después y de los que, a modo de botón de muestra, comentaremos el segundo: *Contributions à l'histoire des connaissances zoologiques*, punto de arranque para un análisis, siquiera somero, de algunos capítulos de la historia de la disciplina.

Christine Lefèvre se remonta en la historia de la Patagonia austral para ejemplificar una relación poco estudiada, la de las aves con el hombre. Reseñan los inventarios 70 especies endémicas, entre paseriformes y marinas, cuyos huesos aparecen mezclados en los yacimientos arqueológicos con vestigios líticos, huesos humanos y montones de conchas. Además de su carne, el nativo aprovecha la médula; la pieza preferida era el cormorán.

Los sumerios clasifican todavía los animales por el medio donde viven: acuáticos, volátiles y terrestres. Pero los registros mesopotámicos distinguen perfectamente entre animales criados por el hombre, aunque no todos forzosamente domésticos, y animales salvajes. Domesticados estaban los bóvidos y ovinos, pero también engordaban cerdos, gamos y ciervos, que vivían en relativa libertad. Además, el análisis de los logogramas ha puesto de manifiesto que usaban una misma raíz genérica para los afines y determinaban la especie atendiendo, entre otras notas distintivas, al pelaje, el vigor, la apariencia y algún rasgo provechoso.

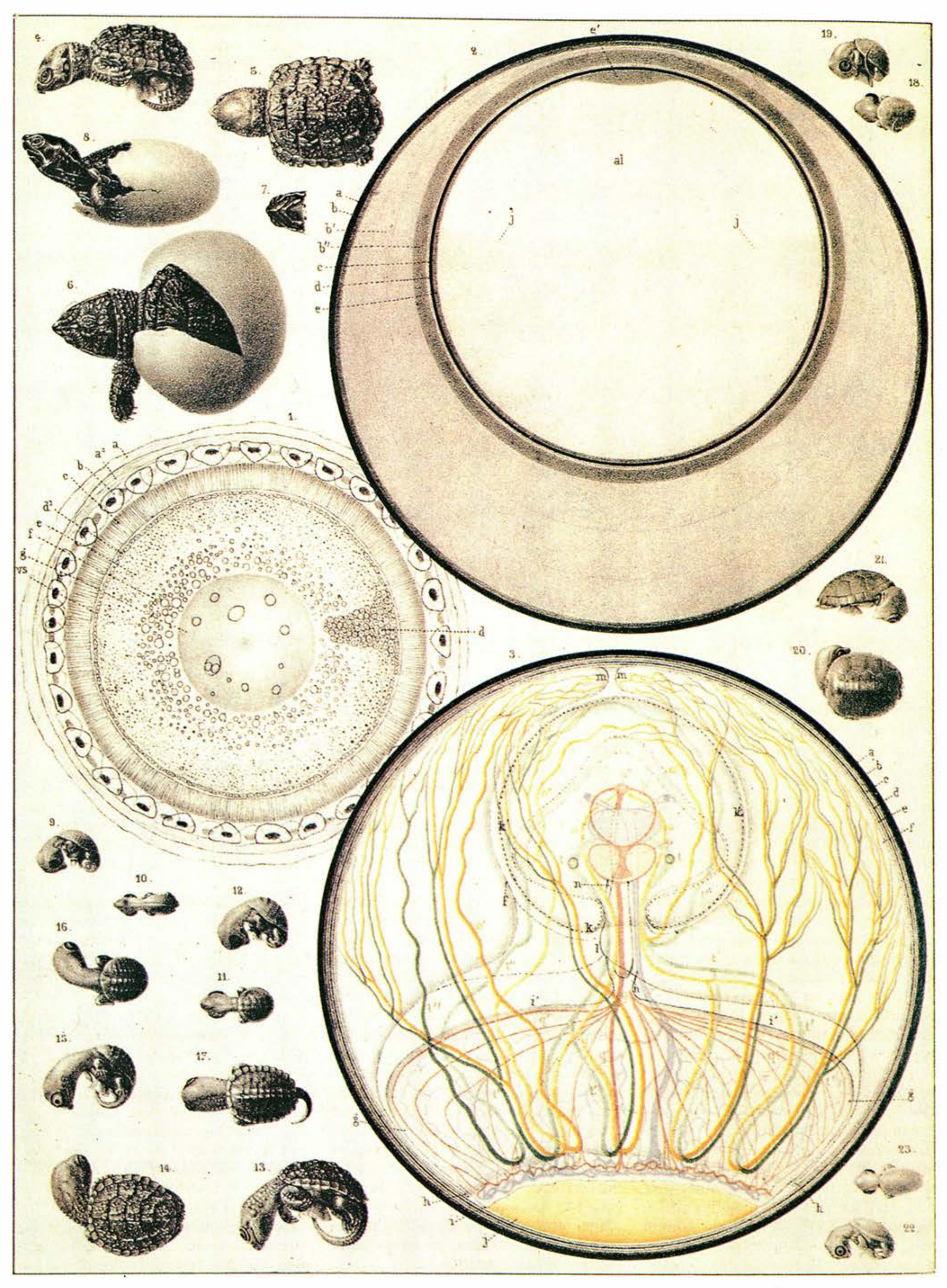
Bodson rastrea hasta Homero las primeras noticias documentadas sobre invasiones de insectos en la antigüedad, de las que la Biblia nos recuerda una famosa octava plaga de langostas. Los autores griegos aportan bastante documentación sobre saltamontes, grillos y otros ortópteros, con profusión de nombres, a veces sinónimos, y cierto conocimiento de sus fases larvarias. Las invasiones, reputadas como castigo de los dioses, no paralizan a los campesinos, los viñadores sobre todo, sino que, al tiempo que procuran aplacar la ira de aquéllos, toman medidas empíricas eficaces, como hogueras, recogida periódica de huevos y larvas, además de la protección oficial de aves insectívoras.

El conocimiento zoológico adquiere el estatuto de ciencia con Aristóteles. No hay lengua moderna importante que no tenga alguna edición, completa o parcial, de su tríada famosa: *Investigación sobre los animales, Sobre las partes de los animales* y *Sobre la generación de los animales*. De los conceptos y teorías vertidos en esos libros extensos ha vivido la zoología por más de un milenio. Es más, la recuperación y traducción occidental de ese trío en el siglo XIII dio el impulso necesario para un avance notable de la zoología en el Medievo y el Renacimiento. Da fe de ello un volumen sin par en una colección de excelencia académica: *Aristotle. De Animalibus. Michael Scot's Arabic-Latin Translation*, de Aafke M. I. van Oppenraaij.

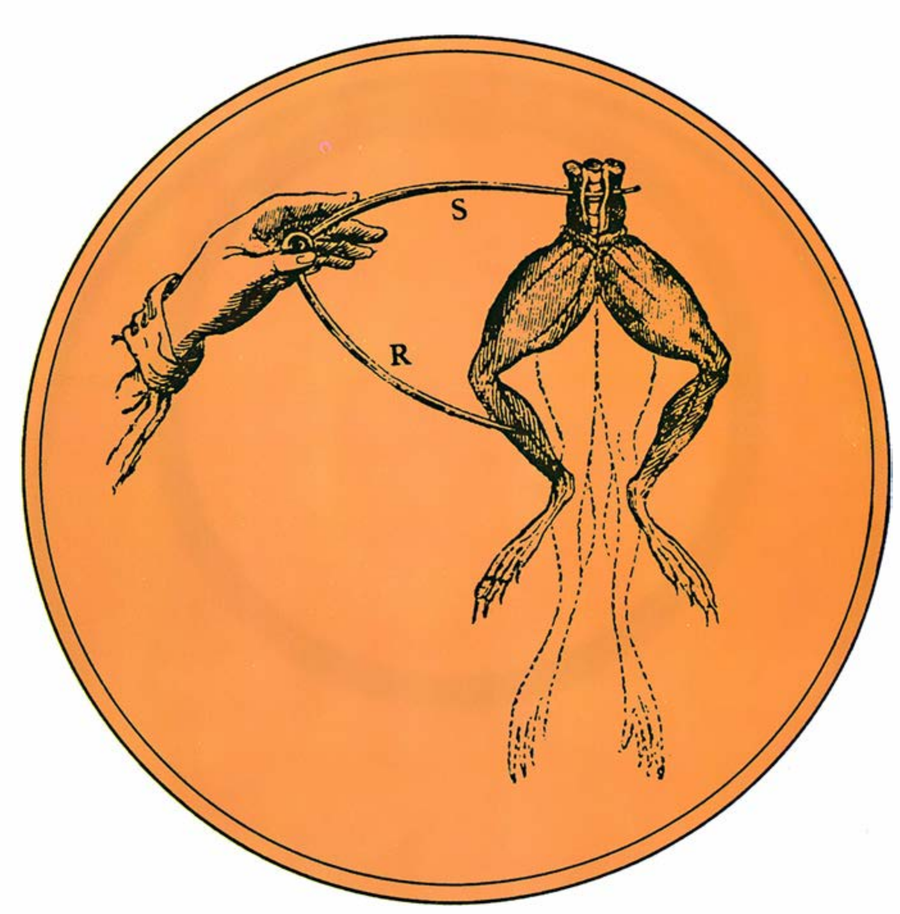
Miguel Scot acabó su traducción latina de una fuente árabe atribuida falsamente a Yahya ibn al-Bitriq en torno a 1220. Los tratados zoológicos del estagirita, aunados bajo el título común de *Sobre las naturalezas de los animales*, aparecen divididos en libros de seriación consecutiva. Van Oppenraaij, que está preparando la edición crítica de todos ellos, nos ofrece en esta primera entrega del XV al XIX, que abarcan *Sobre la generación de los animales.* (A los cuarenta años del trabajo de Scot, Guillermo de Moerbeke realizaría la primera traducción directa del griego al latín de la zoología aristotélica.)

Quién era Scot, cuáles las formas de trasvase de la ciencia árabe al latín y qué resonancia en la cultura de su tiempo tuvieron constituye el nudo del prefacio, escrito por H. J. Drossaart Lulofs, maestro de medievalistas y autor a su vez de varias ediciones críticas de Aristóteles. De las múltiples enseñanzas que destilan texto y notas, no es la menor su análisis minucioso del estado de la cuestión.

Establecida ya la anatomía en una obra precedente, Aristóteles se propuso en este tratado abordar los distintos modos de reproducción de los animales. Entre vertebrados e invertebrados, afirma, existe una discrepancia básica: no suele haber distinción entre macho y hembra en éstos, mientras suele ser palmaria en aquéllos. El macho aporta el principio motor y engendrador, a la hembra compete una función meramente receptora y conformante. El útero femenino, prosigue más adelante, ocupa una posición diversa, aunque siempre interna, según hablemos de ovíparos, vivíparos y ovovivíparos, cuyas propiedades embriológicas le merecen detenida atención.



Huevos y embriones de distintas especies de tortugas, pintados del natural por Henry James Clark y A. Sonrel, a mediados del siglo pasado



Experimento de Galvani para demostrar que la contracción de los músculos debíase a un flujo electronérveo

Para fijar el texto de la versión scotiana, que ejerció una determinante influencia en naturalistas, médicos y filósofos de varios siglos, a través de tratados específicos y obras enciclopédicas, van Oppenraaij se ha sumergido en una treintena larga de manuscritos (uno de Ripoll entre ellos) para colacionar finalmente los seis que reputa más fidedignos, reducibles a su vez a tres grupos principales en razón de su fecha y lugar de copia, aparte de otras consideraciones de crítica interna. Por hallarnos ante una obra de alta investigación, que no debiera faltar en nuestros centros superiores, la abundancia de notas y los índices exhaustivos reciben el máximo cuidado.

Tampoco debiera faltar el *Hexaëmeron* de Robert Grosseteste, en edición crítica de Richard C. Dales y Servus Gieben, publicada en rústica ocho años después de su salida encuadernada al mercado, lo que revela el interés general de la misma, más allá del mero carácter historiográfico. *Hexaëmeron* era el nombre común asignado a los comentarios patrísticos a los seis días de la creación según el relato del Génesis. Ampliamente explotados por los expertos en cosmología, no han captado todavía con fuerza suficiente la atención de quienes se dedican a la historia natural, siendo así que las plantas y los animales, con el hombre como fin, constituyen la razón última de esa exposición.

Por lo que concierne a los animales, la obra de Robert Grosseteste aplica la traducción latina de Michael Scot a la hermenéutica del primer libro de la Biblia. Nos hallamos, pues, ante uno de los primeros esfuerzos de síntesis entre la tradición cristiana y la introducción del Aristóteles biólogo en la Edad Media. Cuando Grosseteste nace, no había universidades en Europa y se estaba trabajando en la traducción de los textos árabes y griegos al latín, pero no habían empezado todavía a asimilarse; cuando fallece, en 1253, las principales universidades europeas vivían en su apogeo y sus profesores manejaban con soltura el pensamiento de Avicena, Averroes o Aristóteles. En esos cambios profundos tuvo él parte destacada, ya en lo institucional como obispo de Lincoln, del que dependía Oxford, ya en su labor docente y de escritor.

El primer cambio que se opera es la secularización de las descripciones. La vertiente alegórica, dominante hasta entonces, cede mucho terreno a la explicación científica basada en la observación. No se elimina el plano teológico, porque "el Legislador no se proponía tanto enseñarnos la naturaleza de los animales que viven en las aguas cuanto la disciplina de la Iglesia y la ordenación de las costumbres", pero se separa claramente del dominio estricto de la historia natural.

La zoología de Grosseteste parte de la existencia de un orden en la naturaleza, anterior a la propia entrada de los seres organizados en la vida, que tiene su base última en el medio donde pueden medrar. Habitan donde habitan, en el agua, en la tierra o el aire, porque están hechos de esa misma materia entorno. Más que de adaptación al medio debe hablarse de una simbiosis con el medio. De acuerdo con su lugar propio, donde no les falta nada para ser lo que son, poseerán más desarrollados unos sentidos u otros, se moverán de una forma u otra, siempre la más pertinente, y mostrarán un tipo de defensa característico. Ese orden estricto queda reflejado en la jerarquización de los seres vivos: las plantas, en ínfimo escalón, luego los animales que viven en el agua y no pueden desplazarse, después los anfibios y, por fin, los vertebrados terrestres. Existe un orden paralelo por razón de la generación. En embriología, el organismo se forma, *Aristoteles dixit*, a partir del corazón o el órgano que haga sus funciones.

Representa el despegue de la zoología en la revolución científica Martin Lister con su *Historiae animalium Angliae tres Tractatus*, publicado por la Regia Sociedad Lodinense en 1678. John Parker y Basil Harley, entomólogos, han preparado la edición del primer tratado, el dedicado a los Araneidos, traducido del latín al inglés por este último y Malcolm Davies con el título *Martin Lister's English Spiders*.

Martin Lister (1638-1712) cierra, con John Ray, un período de la historia natural caracterizado por el acopio más o menos indiscriminado de descripciones anecdóticas, aportadas por la antigüedad clásica o por sus predecesores inmediatos, y abre una nueva línea, la de la sistematización fundada en la observación atenta y exhaustiva de grupos determinados. Lejos habían quedado los libros de cetrería, pero también las rarezas de gabinete. La propia elección de las arañas como objeto de estudio científico suponía un cambio radical.

En 1671 había entrado en la Regia

Sociedad, donde ocupó el cargo de vicepresidente, un puesto privilegiado para seguir de cerca los avances de la revolución newtoniana, conocer las publicaciones continentales y mantener correspondencia con otros científicos, según era uso y mandato. Funda una de las primeras sociedades naturalistas del mundo en la que participan Tancred Robinson, Nehemiah Grew, Samuel Doody y James Petiver, este último estrechamente relacionado con Jaime Salvador, uno de los botánicos españoles más interesantes de las postrimerías del XVII y principios del XVIII. Como la mayoría de los naturalistas de su tiempo, Lister fue médico; e hizo carrera en la corte de Jacobo II, para convertirse más tarde en el escogido por la reina Ana. Espoleado por una curiosidad enciclopédica, se adentró en el mundo de la zoología, de la paleontología y de la arqueología. Tradujo al inglés la *Metamorphosis naturalis* de Johann Goedart, a la que añadió algunos comentarios y grabados.

En su *Tractatus de Araneis* describe 34 especies, con tal detalle y precisión morfológica, que Linneo tomará hasta 13 de ellas para su *Systema naturae*; tras el sueco, los aracnólogos de los siglos posteriores no cesarán de reconocer el acierto de sus observaciones. Divide allí las arañas en razón del número de sus ojos (de ocho, u *octonoculi*, y de dos, o *binoculi*), la formación de telas para cazar y tipos de telarañas. Analiza la morfología externa: quelíceros, pedipalpos, patas ambulacrales, cefalotórax, pedicelo y abdomen. Distingue el dimorfismo sexual. Avanza una rigurosa denominación binomial.

Tomemos, a modo de ejemplo, la descripción de *Araneus quadratus*, la araña amarilla de manchas blancas y muchas pintas amarillentas. Señala color (amarillo o rojizo) y tamaño ("como una avellana"), longitud de cada par de patas y orden de los ojos. Su distribución y hábitat ("en el ápice de matas y arbustos"). Esta araña segrega un hilo, por donde deambula, que va del nido hasta el centro de la tela. Luego revela detalles anatómicos y embriológicos, obtenidos por "disección de algunas hembras" y por haber encerrado en una caja varias hembras grávidas. El editor corrobora, en nota adicional, la exactitud de lo expuesto por Lister: "Fue el primero en advertir que estas y otras arañas se alimentan por succión."

Subiendo un escalón más, de la observación y anatomía a la experimentación, nos encontramos con Luigi Galvani (1737-1798), cuya polémica con Alessandro Volta sobre la naturaleza de la electricidad animal centra el trabajo de Marcello Pera en *The Ambiguous Frog*. Se trata de un estudio de historia (descubrimiento y desarrollo inicial de la electricidad) y epistemología de la ciencia, que aborda distintos aspectos de esta última, como el valor de las hipótesis, pruebas e inferencias, gestalts y paradigmas, contexto de descubrimiento y contexto de explicación, interpretación de las observaciones, el experimento crucial, etcétera, además, y eso es lo que importa aquí, de constituir una buena guía para entender los trabajos electroneuromusculares de Galvani.

El fenómeno de la electricidad caracterizó un amplio segmento del siglo XVIII, con su representante eximio en la botella de Leyden, el primer condensador capaz de almacenarla en abundancia y liberarla con fuerza. No tardaron en elaborarse los conceptos fundamentales de conductor y aislante, y en los años cuarenta Benjamin Franklin esbozaba una teoría de la acción eléctrica basada en la transferencia de ese fluido. ¿Existía también en los animales? ¿De qué naturaleza era?

Los médicos recibieron la electricidad como la nueva panacea. Se comenzó a hablar de curas maravillosas por aplicación de tubos eléctricos solos o revistiendo los fármacos. Sanaban, decíase, los constipados y ciáticos, los reumáticos, sordos y ciegos, todo tipo de pacientes afectos de neuralgias, y muchos más. Había decaído bastante ese fervor cuando Galvani acometió sus experimentos con ranas, mediada la década de los setenta. Algunos hechos, no obstante, seguían demandando explicación, por ejemplo, la contracción del músculo inducida por descargas eléctricas.

Coexistían tres teorías que pretendían dar cuenta del mecanismo de la contracción muscular; a saber, la teoría del flujo nérveo, la de las vibraciones de un medio material y la del fluido nérveo-eléctrico. Tenía que ver la primera con la idea del supuesto "espíritu animal", un humor o fluido sutil que descendía del cerebro y transportaban los nervios hasta los músculos periféricos. La teoría de las vibraciones, desencadenadas por el cerebro, veía en éstas las causantes del movimiento porque los nervios, filamentos sólidos, carecían de canales. La tercera teoría asociaba el flujo nérveo al fluido eléctrico; los músculos se contraían por la acción eléctrica que les inducían los nervios.

Galvani asentó la última opción por la vía más idónea: el refrendo experimental. Para ello, sacrificó ranas, aisló nervios y músculos de lo demás, y aplicó un arco conductor conectado a un condensador; se producía contracción cuando los nervios recibían un impulso eléctrico. Este experimento inicial lo fue refinando y demostró que la electricidad del animal era real, aunque de índole distinta de la existente en la atmósfera o la creada artificialmente en las máquinas. Así se abrió el estudio de la zoología a la física y, con el cambio de mentalidad, a la química de la centuria siguiente. (L. A.)

Epistemología de la medicina

Fundamentos de la clínica

LA CORONA DE LAS CIENCIAS NATURALES. LA MEDICINA EN EL TRÁNSITO DEL SIGLO XVIII AL XIX, por Elvira Arquiola y Luis Montiel, Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Madrid, 1993.

La historia —viene repitiéndose desde que Ortega acuñó la feliz frase— es un entusiasta ensayo de resurrección. Los historiadores de la medicina que aprendimos de Laín —*La historia clínica. Historia y teoría del relato patográfico*— a distinguir claramente en la medicina finisecular y de los primeros decenios de nuestro siglo las tres grandes mentalidades que por entonces, y más o menos imbricadas entre sí, fundamentaban el pensamiento médico sobre la enfermedad, hemos vivido, durante medio siglo casi, en el cómodo esquema de la consideración del proceso morboso como lesión anatómica localizada (pensamiento anatomoclínico), como alteración funcional de un proceso energético-material (pensamiento fisiopatológico) o como resultado de una agresión externa de índole microbiana o química (pensamiento etiopatológico).

Pocas veces hemos considerado que, en realidad, las cosas no podían ser tan sencillas y que más allá y más acá de esa visión, brillantísima, esclarecedora pero un tanto simplista, de la nosología, en aquella época histórica había algo más, por supuesto complicado y difícil de desentrañar, al menos que se dedicase una

fina investigación a iluminar las últimas raíces del entramado. ¿Por qué hasta ahora no se había llevado a cabo esta tarea? Todos somos proclives a la simplificación y la brillante actuación de la escuela anatomopatológica francesa, de una parte, con las figuras señeras de Bichat, Corvisart, Bayle y Laënnec, oscurecían cualquier intento de superar su visión de la enfermedad; y, por otra parte, en el ámbito germano, era tal el malestar que causaba la profundización en la especulación filosóficonatural inaugurada por Schelling, que nos bastaba con saber que de ella había nacido la gloriosa *Naturwissenschaft* madre de la actual medicina fisiopatológica. Pero la historia, repitamos, es un glorioso intento de resurrección, y precisábamos dar vida a la enmohecida estructura, tanto años mantenida.

Y aquí viene la animosa tarea de dos profesores de historia de la medicina de la Universidad Complutense de Madrid: Elvira Arquiola y Luis Montiel. Ambos han superado, en su investigación, los rígidos y mantenidos esquemas, dedicándose al estudio de lo que, además de ellos, fueron realmente las medicinas francesa y germana en el interludio de los siglos XVIII al XIX. De este modo, resucitando esa realidad adormecida, nos han ofrecido, bajo el título acuñado en una frase de Schelling, "La corona de las Ciencias naturales", una rica visión de los esfuerzos realizados a uno y otro lado del Rin por conceder a la medicina su verdadero puesto en la historia de las ciencias.

La medicina, en efecto, dejó dicho Bichat al iniciarse el siglo XIX, había sido rechazada mucho tiempo del seno de las ciencias naturales. Y aunque el patólogo y estequiólogo francés propuso su conocido programa de fundamentar el estudio de la enfermedad en los hallazgos necrópticos, no estuvo solo en la faena. Ante la crisis epistemológica de la medicina era preciso hallarle un nuevo fundamento, y en Francia, sabemos ahora, ello se llevó a cabo recuperando el sensualismo a través de Sauvages y de la Escuela de Montpellier y sobreponiendo, a la necesaria anatomía patológica, la habilidad quirúrgica, convirtiendo en externa la patología interna. Pero algo más era necesario: la utilización en medicina de otras ciencias como modelo (la botánica, las matemáticas, la física y la química) y, en posesión ya de sus métodos, buscar un camino propio que la condujese hacia un saber científico acerca del hombre. Lo cual requería, como confesaba Bordeu, "dirigir todos nuestros esfuerzos y todos los estudios a una medicina filosófica". Por ello fue imprescindible apelar a los filósofos de la *Idéologie* y sobre todo a la obra de Cabanis.

Entre tanto, en Alemania se llegaba también a una filosofía de la medicina, con Kant al fondo y la *Naturphilosophie* en primera línea: una filosofía que más allá de la temida especulación había de llevar también a una "ciencia del hombre". El papel de la clínica en esta empresa, aunque nos resulte extraño, fue fundamental, según se desprende de este estudio. Los nombres de Markus, Röschlaub, Killian, Döllinger y von Walther, por supuesto con los de Reil y Kieser, van creando una nueva ciencia de la naturaleza y una nueva medicina.

La tercera parte de la obra se titula "El despliegue de la teoría médica contemporánea". En centenar y medio de páginas, ambos autores estudian ahora cómo esa nueva ciencia médica se desarrolla en ambos países considerados: fundamentalmente a través del método analítico en Francia, tanto en lo que se refiere a la enseñanza de la medicina como al conocimiento del hombre sano y al estudio de la enfermedad; pasando de la certidumbre a la probabilidad para llegar a elaborar una teoría general de la enfermedad, tanto desde las doctrinas vitalistas como desde las de los defensores del método anatomoclínico, del sistema químico y de la doctrina de Broussais. En Alemania, a través de la consideración de la fisiología como ciencia de los organismos (como telón de fondo el antiguo vitalismo y la doctrina foránea de la excitabilidad), bajo el dominio de la *Naturphilosophie*. Se concede así una fundamentación fisiológica a la patología, con un nuevo discurso teórico sobre la salud y la enfermedad.

Dejemos hablar a ambos autores: "Mediante nuestra investigación hemos intentado comprender de qué modo la medicina pudo abrirse camino entre otras ciencias mejor asentadas, al menos provisionalmente, que ella misma. Pero, además, en el curso de nuestro trabajo hemos podido contemplar cómo desde este objetivo, orientado por una ambición preponderantemente intelectual, algunos autores... evolucionan hacia otro cuyas pretensiones son muy superiores: hacer de la medicina la 'ciencia del hombre' por antonomasia, y aún más, la 'corona de las ciencias naturales'".

Y como colofón, tras su intención de principios, las palabras de Laín en el prólogo de la obra: ..."el destino de este libro debe consistir no sólo en la lectura y la favorable estimación de los historiadores de la medicina; también —sobre todo, me atrevo a decir— en la lectura y la reflexión de cuantos médicos quieren ver con alguna ambición intelectual el ejercicio de su profesión". La historia, una vez más, ejerciendo su taumatúrgica tarea de resucitar el pasado, desvelándolo, como en esta ocasión, de modo tan sutil y brillante y actuando como espuela incitadora —otra vez la metáfora orteguiana— al servicio de toda la profesión médica. (A. A.)

Relatividad

Cosmología

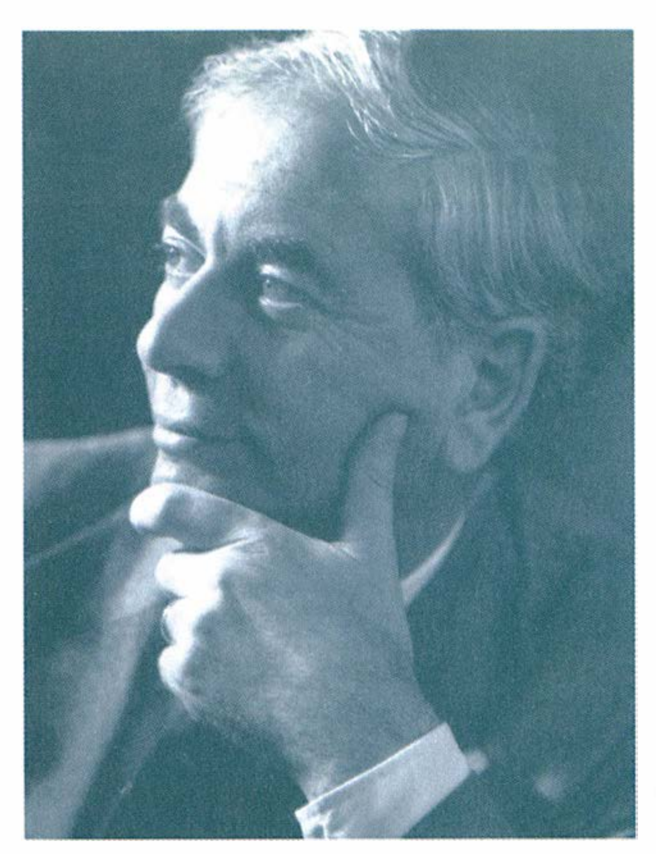
THE RENAISSANCE OF GENERAL RELATIVITY AND COSMOLOGY. Dirigido por George Ellis, Antonio Lanza y John Miller. Cambridge University Press, Cambridge, 1993.

Estamos ante el típico libro-homenaje, editado en este caso con motivo del 65 aniversario de Dennis W. Sciama, director del sector de astrofísica de la Escuela Internacional de Estudios Avanzados (SISSA) en Trieste. Recoge una colección de artículos de diferentes autores, que representan la versión escrita de las charlas que se dieron en dicha ciudad italiana en abril de 1992, durante la reunión científica que se organizó para rendir homenaje a Sciama.

Un homenaje perfectamente justificado, ya que Sciama es uno de los especialistas en relatividad general con mayor prestigio, tanto en el Reino Unido, de donde es originario, como en el resto de Europa. Inició su carrera en Cambridge y después pasó a Oxford, para aposentarse en Trieste, donde reside desde 1983. Su actividad se ha centrado en los aspectos teóricos y observacionales de la astrofísica y de la cosmología relativistas, sin que esto signifique que no haya estado presente en otros temas ligados a la teoría de la relatividad de Einstein. Sciama fue uno de los entusiastas de la teoría cosmológica del estado estacionario, hasta que en 1965 Penzias y Wilson descubrieron la radiación de fondo de microondas, momento en el que demostró una gran honradez científica comenzando

a trabajar arduamente en el modelo de la gran explosión.

Por lo que se refiere al contenido, al tratarse de una sucesión de artículos independientes, no se presta a un comentario ordenado y concatenado que permita al lector hacerse una idea globalizada y coherente del mismo. No obstante, con la lectura de estos artículos, uno se va enterando poco a poco de que los temas tratados no están muy alejados unos de otros y que en general guardan una conexión sutil. La razón de este fenómeno se descubre cuando algunos autores explican que los organizadores han marcado una línea de actuación, que consiste simplemente en "exigirles" que escriban acerca de temas relacionados con la investigación realizada por Sciama. Esta directriz de los organizadores conduce a lo que puede ser al mismo tiempo una virtud y un defecto del libro.



Dennis Sciama (1926 -)

En efecto, cuando alguien escribe (hace) ciencia con libertad absoluta es cuando está en condiciones óptimas de generar algo con rasgos claros de originalidad, mientras que cuando se escribe ciencia por encargo, aunque sea con gran ilusión, todo lo más se alcanzan cotas serias de reflexión profunda, que generalmente es el producto de una larga experiencia previa. Afortunadamente en este caso encontramos una importante dosis de esto último, lo cual hace que en su conjunto el libro sea un magnífico encuentro con resultados conocidos, expuestos con la perspectiva necesaria para observarlos en sus aspectos más valiosos.

Si a esto añadimos la pluralidad de los mismos y alguna novedad aislada e interesante, podemos concluir que el libro ofrece un excelente repaso de los temas que han constituido la cabeza de puente de la relatividad general en los últimos treinta años. Una excepción lamentable a señalar es la ausencia de trabajos relacionados con las ondas gravitacionales, sobre todo ahora que han pasado a la primera plana de la actualidad por la concesión del premio Nobel a Taylor y Hulse, descubridores del primer pulsar (PSR 1913 +16) que según todos los indicios emite dichas ondas. Sin embargo dicha ausencia es coherente con las directrices ya señaladas.

Del conjunto de los 21 artículos se podrían extraer tres subconjuntos bien diferenciados. En primer lugar aquellos que se ocupan de problemas de fundamentos en relatividad general, entre los que cabe destacar una muy agradable revisión del principio de Mach, que en su versión más conocida afirma que "la inercia de un cuerpo es debida a la presencia del resto de materia en el universo". Este artículo es muy recomendable para cuantos quieran iniciarse en este principio o deseen profundizar en el mismo. En este subconjunto de los fundamentos quisiera destacar un artículo dedicado a fuerzas de inercia en relatividad general, que representa una aportación al mismo tiempo novedosa y antigua, pues plantea el viejo y nuevo problema de los sistemas de referencia distinguidos en el marco de la relatividad general, algo que molesta a los defensores de la covariancia general, pero que sin duda se encuentra en el propio proceso de génesis de la teoría. No hay que olvidar que Einstein propuso dicha covariancia general al no haber encontrando la generalización correcta de los sistemas de referencia rígidos de la mecánica clásica.

En un segundo grupo de artículos podemos colocar los dedicados a la astrofísica y cosmología relativistas. Tres de ellos merecen comentarios especiales. En primer lugar un artículo dedicado a las funciones de distribución de galaxias, cuya claridad, abundancia de datos y larga enumeración de problemas abiertos le sitúan en un buen puesto de lectura preferente. A continuación, un artículo del propio Sciama, en el que se analiza una hipótesis suya, según la cual la materia oscura en la Vía Láctea está formada por neutrinos tauónicos, así como el hecho de que su desintegración en fotones y neutrinos electrónicos y muónicos sea la responsable de la ionización del hidrógeno en el medio interestelar. Por fin, un artículo consagrado al análisis de los principios cosmológicos "que en el mundo han sido", donde se puede aprender mucho de los fundamentos de la cosmología moderna y de su evolución.

El último grupo de artículos, el menos numeroso, tiene una vocación mecano-cuántica: sus contenidos ponen de manifiesto la preocupación de sus autores por dilucidar una conexión entre la teoría cuántica y la gravitación, problema que empieza a configurarse como una auténtica asignatura pendiente de la física teórica actual. De entre estos artículos es obligado referirse al de Roger Penrose, que una vez más nos deleita con planteamientos de gran originalidad, en éste mediante extraños artilugios con forma dodecaédrica que permiten realizar un experimento ideal para profundizar en el concepto de la no-localidad en física.

En resumen, se trata de un libro que interesará a todos los expertos en relatividad general y en astrofísica y cosmología relativistas. Su lugar en la biblioteca debería ser equidistante entre las revistas y los libros ordinarios, pero sin mezclarlo con los "proceedings" de congresos, pues contiene dosis de reflexión y perspectiva científicas poco habituales.

Como colofón considero justo señalar que la bibliografía que aparece en cada artículo del libro es amplia y bien distribuida en el tiempo, lo que le proporciona un valor añadido de consulta. (J. M.)

Apuntes

Los filósofos de cualquier escuela suelen ver en los cimientos de su doctrina el origen de toda nueva proposición que se suponga correcta. ¿Se está infectando la ciencia con ese virus? Espigando en lo publicado en el último mes, saquemos dos botones de muestra: la lluvia ácida fue descubierta en 1852 por Augustus Smith y redescubierta en los años cincuenta de nuestro siglo; la hipótesis de la evolución por saltos no tiene 21 años de antigüedad, sino 128, pues fue ya planteada por P. Trémaux en 1865 en *Origine et Transformations de l'Homme et les Autres Êtres*. La moda no disculpa, sin embargo, el desconocimiento que la mayoría de los científicos tienen de la historia de su disciplina.

La observación del comportamiento de los chimpancés en la selva guineana de Bossou ha registrado unas habilidades desconocidas. Los primates encaramados en la palma *Elaeis guineensis* extraen el jugo de las hojas con una suerte de mano de mortero y se lo beben luego con una esponja de fibra. Aunque esa habilidad resulta parangonable con la fabricación de otros instrumentos, como el martillo y yunque de piedra, el bastón excavador o la esponja foliar, nadie había advertido ese ingenio de los chimpancés para exprimir el jugo y usar la mano del mortero.

Las mesetas oceánicas son extensas acumulaciones de rocas volcánicas y plutónicas cuyo origen y naturaleza distan mucho de ser conocidos. Su volumen enorme y frecuente presencia desde el Cretácico en todas las cuencas oceánicas denuncia su interés para la evolución térmica y química de la Tierra. De ahí la importancia de un hallazgo reciente: xenolitos granulíticos máficos en la meseta de Kerguelén, en el océano Indico. En efecto, los granulitos aparecen sólo en continentes, donde la corteza posee espesor suficiente para sufrir las presiones y temperaturas elevadísimas que necesita la formación de granulitos. Se supone, como hipótesis más verosímil, que los xenolitos de Kerguelén son magmas basálticos.

La química inorgánica y la ingeniería química tienen un campo de interés común que vienen abonando desde hace años. Nos referimos a los sólidos microporosos que, según ejemplifican las zeolitas, adquieren una importancia suprema como catalizadores selectivos de la forma, sustancias de intercambio iónico y tamices moleculares, siempre y cuando se conozca su estructura. En su mayoría, se trata de silicatos, aluminosilicatos o aluminofosfatos, compuestos todos que presentan átomos metálicos de coordinación tetraédrica. Hace cinco años se descubrió una familia de titanosilicatos microporosos de coordinación octaédrica. Pero el desorden que en ellos reina hacía imposible aprehender su estructura. La técnica ingenieril la ha domeñado por fin. Mediante la oportuna combinación de microscopía electrónica, difracción de rayos X, resonancia magnética nuclear, modelización molecular y análisis químico se ha descubierto que tienen tetraedros de SiO_4 y octaedros de TiO_6 enlazados por puentes de átomos de oxígeno.

Botánicos, zoólogos, microbiólogos y paleontólogos saben que el denominar los nuevos especímenes es todo un arte, donde la creación imaginativa juega con la precisión puntillista. Viene esto a cuento del *Ambulocetus natans*, un cetáceo capaz de andar y nadar, intermedio entre nuestras ballenas y sus precursores terrestres, extinguidos, que vivieron hace 50 millones de años. Este mamífero de peso y hechuras de león marino poseía brazos cortos y manos extensas. El debate se centra ahora en saber si era un derivado de un ungulado terrestre o una forma primitiva de ballena.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL AEROSOL DE SULFATOS Y EL CAMBIO CLIMATICO, por Robert J. Charlson y Tom M. L. Wigley

Las emisiones industriales de azufre forman partículas que reflejan al espacio la radiación solar, enmascarando así el efecto de invernadero sobre algunas partes de la Tierra.

ARQUITECTOS MOLECULARES DEL DISEÑO CORPORAL, por William McGinnis y Michael Kuziora

La introducción de un gen humano en una mosca, argumento verosímil de una película de fantasía científica, demuestra que las formas corporales de todos los animales se definen por mecanismos moleculares casi idénticos.

ESPEJOS LIQUIDOS, por Ermanno F. Borra

Espejos de mercurio líquido muy ligeros, cuyas dimensiones superen con mucho las de los espejos de cristal, podrán permitir la construcción de telescopios gigantes y ver más allá de lo percibido hasta ahora.

¿VER ES CREER?, William J. Mitchell

La manipulación digital de imágenes ha desvirtuado la evidencia fotográfica.

SIDA Y CONSUMO DE DROGAS, por Don C. Des Jarlais y Samuel R. Friedman

La epidemia del sida sigue aumentando entre quienes se inyectan drogas, pero podría frenarse si los gobiernos se mostraran más proclives a adoptar programas de prevención eficaces.

LAS AVES DEL TERROR SUDAMERICANAS, por Larry G. Marshall

Grandes y veloces, fueron los carnívoros dominantes del continente durante millones de años, hasta que sus competidores los condujeron a la extinción.

LA METAFISICA DE LAS PARTICULAS, por John Horgan

Tras el naufragio del supercolisionador superconductor, los físicos están divididos acerca de cómo deberían, o si deberían siquiera, seguir buscando una teoría unificada de la naturaleza.

COMUNIDADES PREHISPANICAS DE BAJA CALIFORNIA, por J. M. Fullola, M. M. Bergadà, V. del Castillo, M. A. Petit y A. Rubio

Las pinturas rupestres de las cuevas y abrigos de Baja California (México) muestran una serie de rasgos propios de sociedades cazadoras-recolectoras.

